



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΝΙΚΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ
ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ & ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ
ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΓΕΩΔΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ
ΜΕ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Ε. ΗΛΙΟΔΡΟΜΙΤΗΣ

διδακτορική διατριβή

ΑΘΗΝΑ ΜΑΪΟΣ 2017

Αθανάσιος Ε. Ηλιοδρομίτης

Αγρονόμος & Τοπογράφος Μηχανικός ΕΜΠ

MSc Γεωπληροφορική, ΕΜΠ

MBA Τεχνο-Οικονομικά Συστήματα, ΕΜΠ – Παν. Πειραιά

ailiodro@gmail.com

Copyright © Αθανάσιος Ε. Ηλιοδρομίτης, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

«Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από τη Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, δεν υποδηλοί αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα»

(άρθρο 202, Ν. 5343/1932)

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.

Πρόλογος

Η έμφυτη τάση του ανθρώπου για γνώση και μάθηση έχει οδηγήσει από τις αρχές, ήδη, της ανθρώπινης ιστορίας σε μεγάλες ανακαλύψεις. Η περιέργεια για το φυσικό κόσμο και τα φαινόμενα που συνέβαιναν γύρω από τον άνθρωπο, του δημιούργησαν ερωτηματικά και τον έκαναν να αναζητήσει απαντήσεις σχετικές με το περιβάλλον του.

Κάπως έτσι ξεκίνησε πριν χιλιάδες χρόνια να κατασκευάζει όργανα που βοηθούσαν στην παρατήρηση και καταγραφή του φυσικού περιβάλλοντος. Με το πέρασμα των αιώνων τα όργανα αυτά, εξελίσσονταν, βελτιώνονταν και κατέστη δυνατό να μετρούν όλο και περισσότερα φυσικά μεγέθη, με όλο και μεγαλύτερη ακρίβεια. Τις τελευταίες δεκαετίες, η εξέλιξη της τεχνολογίας και των επιστημών όπως η φυσική, η πληροφορική και οι τηλεπικοινωνίες είναι ραγδαία.

Τα όργανα μέτρησης – οι αισθητήρες – μπορούν πλέον να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον, να καταγράφουν τις τιμές φυσικών μεγεθών, να τις επεξεργάζονται σε πραγματικό χρόνο και να τις αποστέλλουν σε οποιοδήποτε σημείο της γης. Επιπλέον είναι δυνατόν να προβλέπουν τη μελλοντική εξέλιξη φυσικών φαινομένων, αλλά και να προτείνουν πιθανές λύσεις σε περίπτωση που αυτά ξεπεράσουν τα αναμενόμενα όρια.

Ελάχιστη σημασία έχει η μετρούμενη τιμή οποιουδήποτε φυσικού μεγέθους, εάν αυτή δε συνοδεύεται και από τη θέση στην οποία μετρήθηκε. Έτσι αναπτύχθηκε τα τελευταία χρόνια η επιστήμη των γεωαισθητήρων (geosensorics). Απόρροια αυτού ήταν η ανάπτυξη και υλοποίηση ασύρματων δικτύων γεωαισθητήρων για το συνεχή έλεγχο και παρακολούθηση φαινομένων τόσο σε τεχνικά έργα, όσο και στο περιβάλλον.

Η γεωδαισία είναι επιστήμη που κατεξοχήν βασίζεται στην παρατήρηση και μέτρηση του φυσικού περιβάλλοντος. Ο Τοπογράφος Μηχανικός καλείται να εκμεταλλευτεί τις νέες τεχνολογίες και βασιζόμενος σε αυτές να αναπτύξει μεθόδους υλοποίησης δικτύων και μέτρησης σε εφαρμογές που μέχρι σήμερα ήταν δύσκολο ή ακόμα και αδύνατο να πραγματοποιηθούν.

Άλλωστε, όπως εύστοχα έχει επισημανθεί: "αν θεωρήσουμε ένα όργανο τηλεπισκόπισης ως το «τηλεσκόπιο» που παρακολουθεί τα φυσικά φαινόμενα στη Γη και μια παραδοσιακή πλατφόρμα αισθητήρων ως το «ανθρώπινο μάτι», τότε ένα ασύρματο δίκτυο γεωαισθητήρων μπορεί να νοηθεί ως ένα «μικροσκόπιο του περιβάλλοντος», το οποίο μας παρέχει μια χωρική και χρονική ανάλυση των παρατηρήσεων, που δεν είχε χρησιμοποιηθεί ποτέ στο παρελθόν" (Nittel, 2009).

Ευχαριστίες

Δε θα είχε νόημα η περαιτέρω ανάγνωση του παρόντος τεύχους, εάν πρώτα δεν εξέφραζα τις θερμές ευχαριστίες μου σε όλους εκείνους που συνέβαλαν, ο καθένας με τον τρόπο του, στην εκπόνηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Ευχαριστώ θερμά τον κύριο Γεώργιο Πανταζή, αναπληρωτή καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ και επιβλέποντα της διδακτορικής μου διατριβής, για την καθοδήγησή του σε όλη τη διάρκεια αυτής. Η συνεργασία μας ήταν άρτια σε κάθε επίπεδο. Αποτελεί αστείρευτη πηγή έμπνευσης και παρότρυνσης – ακόμα και σε κρίσιμες καμπές – από τα φοιτητικά μου χρόνια έως και σήμερα.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον κύριο Βασίλειο Βεσκούκη, αναπληρωτή καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ. Διαδραμάτισε καθοριστικό ρόλο στην επιλογή του θέματος της διατριβής μου, ενώ απέδειξε και έμπρακτα το ενδιαφέρον του με τη συνεργασία του, τις ιδέες του και με τη συνεχή καθοδήγησή του.

Ευχαριστώ εκ βαθέων την κυρία Ορθοδοξία Αραμπατζή, επίκουρη καθηγήτρια της Σχολής Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ, για την άμεση ανταπόκριση της και κυρίως για την υποστήριξή της από την πρώτη ημέρα που συμμετείχα στις δραστηριότητες του Εργαστηρίου Γενικής Γεωδαισίας.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στην κυρία Ευαγγελία Λάμπρου, αναπληρώτρια καθηγήτρια της Σχολής Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ, για το αμείωτο ενδιαφέρον της για την εξέλιξη και την πρόοδο μου τόσο κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής, όσο και όλα τα χρόνια πριν από αυτήν. Ο επαγγελματισμός της και οι συζητήσεις μαζί της με όπλισαν με τις απαιτούμενες γνώσεις αλλά και τη δύναμη να ολοκληρώσω τη διατριβή.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις αμέριστες ευχαριστίες μου προς την οικογένειά μου – τους γονείς μου, Στάθη και Αθανασία και την αδερφή μου, Κωνσταντίνα – και προς όλους τους κοντινούς μου ανθρώπους, για το ενδιαφέρον τους, την υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια, την υπομονή τους αλλά κυρίως για όλα όσα μου έχουν προσφέρει.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	I
Ευχαριστίες.....	III
Περιεχόμενα.....	V
Περίληψη.....	IX
Abstract	XIII
Σχήματα.....	XVII
Πίνακες.....	XIX
Εικόνες.....	XIX
Ακρωνύμια.....	XXI
Συμβολισμοί.....	XXIII
Εισαγωγή.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	5
Περί γεωαισθητήρων και ασύρματων δικτύων γεωαισθητήρων.....	5
1.1 Ορισμοί.....	5
1.2 Η ιστορική εξέλιξη των δικτύων γεωαισθητήρων.....	6
1.3 Τρόπος λειτουργίας.....	8
1.4 Τυπικά μέρη ενός γεωαισθητήρα.....	10
1.4.1 Επεξεργαστής.....	11
1.4.2 Μνήμες.....	11
1.4.3 Πομποδέκτης.....	11
1.4.4 Πηγή τροφοδοσίας.....	12
1.4.5 Αισθητήρες.....	13
1.4.6 Σύστημα εντοπισμού.....	13
1.5 Στατικά χαρακτηριστικά ενός γεωαισθητήρα.....	14
1.6 Παράμετροι αξιολόγησης γεωαισθητήρων.....	15
1.6.1 Κατανάλωση ενέργειας.....	16
1.6.2 Μέγεθος & κόστος.....	16
1.6.3 Ευελιξία χρήσης.....	17
1.6.4 Ασφάλεια.....	17
1.6.5 Επικοινωνία.....	18

1.6.6	Υπολογιστική ισχύς	19
1.7	Είδη δικτύων γεωαισθητήρων	20
1.8	Παράμετροι αξιολόγησης δικτύου γεωαισθητήρων	24
1.9	Εφαρμογές δικτύων αισθητήρων και γεωαισθητήρων	25
1.9.1	Γεωδαιτικές εφαρμογές.....	27
1.9.1.1	Παρακολούθηση μικρομετακινήσεων	27
1.9.1.2	Γεωμετρική τεκμηρίωση κατασκευών	31
1.9.2	Περιβαλλοντικές εφαρμογές	31
1.9.2.1	Ανίχνευση πυρκαγιών	31
1.9.2.2	Ατμοσφαιρική ρύπανση	33
1.9.3	Μεταφορές.....	35
1.9.3.1	Έλεγχος μεταφορών και συγκοινωνιών	35
1.9.3.2	Παρακολούθηση στόλου οχημάτων	35
1.9.4	Άλλες εφαρμογές	36
1.9.4.1	Εφαρμογές εθνικής ασφάλειας.....	36
1.9.4.2	Γεωργία	37
1.10	Τοπολογία δικτύου γεωαισθητήρων	38
1.10.1	Τοπολογία αρτηρίας - Bus.....	38
1.10.2	Τοπολογία δακτυλίου - Ring	39
1.10.3	Τοπολογία πολλαπλών κόμβων	40
1.10.4	Τοπολογία Δέντρου - Tree	41
1.10.5	Τοπολογία πλέγματος - Mesh.....	42
1.10.6	Τοπολογία πλήρους σύνδεσης – Fully connected	44
1.10.6.1	Τοπολογία τριγώνου	44
1.10.7	Τοπολογία αστέρα - κυψέλης.....	46
1.10.7.1	Τοπολογία αστέρα – κυψέλης με επικαλύψεις.....	47
1.10.8	Πολυκριτηριακή αξιολόγηση	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2		53
Μεθοδολογία χωροθέτησης ασύρματων δικτύων γεωαισθητήρων.....		53
2.1	Ορισμός του προβλήματος	53
2.2	Υφιστάμενες λύσεις στο πρόβλημα της χωροθέτησης	54
2.3	Ο κλάδος της υπολογιστικής γεωμετρίας.....	60
2.3.1	Πεδία εφαρμογών της υπολογιστικής γεωμετρίας.....	61
2.4	Πολύγωνα Voronoi	63

2.5	Κεντροειδής διαμέριση Voronoi.....	66
2.5.1	Μαθηματικό μοντέλο CVT	69
2.5.2	Κεντροειδής διαμέριση Voronoi σε άλλες μετρικές.....	72
2.5.3	Ο αλγόριθμος του Lloyd για κατασκευή CVT	73
2.6	Χωροθέτηση ασύρματου δικτύου γεωαισθητήρων με χρήση CVT ...	76
2.6.1	Προσδιορισμός βέλτιστων θεωρητικών θέσεων εγκατάστασης	77
2.6.2	Προσδιορισμός πραγματικών θέσεων εγκατάστασης.....	80
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3		85
Μεθοδολογία αξιολόγησης χωροθέτησης ασύρματου δικτύου γεωαισθητήρων		85
3.1	Η σημασία της αξιολόγησης.....	85
3.2	Υφιστάμενες λύσεις στο πρόβλημα της χωρικής αξιολόγησης δικτύων	87
3.3	Εναλλακτικές μετρικές αξιολόγησης	88
3.3.1	Έλεγχος χωρικής κατανομής με το δείκτη Clark-Evans.....	88
3.3.2	Εμβαδόν των τριγώνων	90
3.3.3	Περίμετρος των τριγώνων.....	91
3.3.4	Τυπική απόκλιση της μέσης τιμής των πλευρών του τριγώνου	91
3.3.4.1	Μέση τιμή της τυπικής απόκλισης πλέγματος τριγώνων.....	92
3.3.4.2	Ο δείκτης g	95
3.3.5	Σύγκριση εναλλακτικών μετρικών	95
3.4	Τριγωνισμοί σημείων στο επίπεδο.....	96
3.4.1	Τριγωνισμός συνόλου σημείων	97
3.4.2	Τριγωνισμός Delaunay.....	99
3.5	Ο αλγόριθμος αξιολόγησης	100
3.6	Ανάλυση ευαισθησίας	101
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4		103
Λογισμικό χωροθέτησης και γεωμετρικής αξιολόγησης ασύρματων δικτύων γεωαισθητήρων		103
4.1	Γενικά	103
4.2	Το ολοκληρωμένο μαθηματικό λογισμικό Matlab	103
4.3	Λογισμικό OptEval	105
4.3.1	Διαδικασία χωροθέτησης δικτύου	106

4.3.2	Διαδικασία αξιολόγησης δικτύου	111
4.4	Προσομοίωση αλγορίθμου χωροθέτησης και αξιολόγησης	112
4.4.1	Προσομοίωση αλγορίθμου χωροθέτησης σε ειδικές περιπτώσεις	119
4.4.1.1	Ζώνη επιρροής (buffer zone) γύρω από την περιοχή μελέτης	120
4.4.1.2	Ύπαρξη κενών περιοχών εντός της περιοχής μελέτης.....	122
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....		127
Συμπεράσματα - Προτάσεις.....		127
5.1	Συμπεράσματα	127
5.1.1	Η μεθοδολογία χωροθέτησης	128
5.1.2	Η μεθοδολογία αξιολόγησης	130
5.1.3	Συμπεράσματα από την προσομοίωση.....	132
5.2	Προτάσεις	133
Βιβλιογραφία		137
Ιστογραφία.....		147
Παράρτημα.....		149

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και γεωαισθητήρων (WSN και GSN) εξελίσσονται με γρήγορο ρυθμό και σήμερα συνθέτουν ένα ισχυρό εργαλείο για την παρακολούθηση και την παρατήρηση του φυσικού περιβάλλοντος. Η χρήση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι κομβικής σημασίας για τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης, που ολοένα και συχνότερα χρησιμοποιούνται σήμερα.

Στη διατριβή αυτή αναπτύσσεται μια νέα μεθοδολογία χωροθέτησης και αξιολόγησης ασύρματων δικτύων αισθητήρων και γεωαισθητήρων. Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να αξιοποιηθεί σε οποιαδήποτε εφαρμογή παρουσιάζεται η απαίτηση για δίκτυα αισθητήρων, με ή χωρίς περιορισμούς ως προς τις θέσεις εγκατάστασης των αισθητήρων, όπως για παράδειγμα η εγκατάσταση δικτύου αισθητήρων ανίχνευσης πυρκαγιών σε δασική περιοχή ή η εγκατάσταση εκτεταμένου δικτύου αισθητήρων για ανίχνευση μικρομετακινήσεων ή παραμορφώσεων.

Η διδακτορική διατριβή αποτελείται από 5 κεφάλαια.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται η σχετικά νέα επιστήμη των γεωαισθητήρων (geosensorics). Δίνονται βασικές έννοιες και ορισμοί που βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση των οργάνων αυτών ως μέσα ανίχνευσης και παρακολούθησης φυσικών και τεχνητών φαινομένων. Γίνεται αναφορά στα σημαντικότερα ιστορικά ορόσημα της εξέλιξης των ασύρματων αισθητήρων και των ασύρματων δικτύων αισθητήρων και γεωαισθητήρων.

Στη συνέχεια αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας ενός ασύρματου δικτύου γεωαισθητήρων και καταγράφονται αναλυτικά τα τυπικά μέρη και τα χαρακτηριστικά της συσκευής. Έτσι γίνονται περισσότερο κατανοητά στον αναγνώστη οι ιδιαιτερότητες, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των γεωαισθητήρων, τόσο όταν λειτουργούν μεμονωμένα, όσο και όταν λειτουργούν σε επικοινωνία μεταξύ τους. Επίσης αναλύονται και ερμηνεύονται οι παράμετροι αξιολόγησης των γεωαισθητήρων και των δικτύων γεωαισθητήρων. Οι παράμετροι αυτοί είναι κρίσιμοι στην επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Για να γίνει κατανοητή η ανάγκη παρακολούθησης φαινομένων με τη βοήθεια ασύρματων δικτύων γεωαισθητήρων, αναφέρονται ενδεικτικά ορισμένες εφαρμογές – από διαφορετικά επιστημονικά πεδία – στις οποίες ήταν επιβεβλημένη η χρήση αντίστοιχων δικτύων.

Στο τέλος του πρώτου κεφαλαίου αναλύονται οι διαφορετικές εναλλακτικές τοπολογίες σύνδεσης των ασύρματων δικτύων, αναπτύσσονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, αξιολογούνται και τεκμηριώνεται γιατί τελικά επιλέγεται η τοπολογία κυψέλης, στην οποία βασίζεται η περαιτέρω ανάπτυξη της μεθοδολογίας.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** αναπτύσσεται το πρόβλημα της βέλτιστης χωροθέτησης ασύρματων δικτύων γεωαισθητήρων στο οποίο εστίασε η παρούσα διατριβή, καθώς και η προτεινόμενη μεθοδολογία επίλυσής του. Αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στον κλάδο της υπολογιστικής γεωμετρίας και στα πεδία εφαρμογών της. Η επίλυση του προβλήματος προσεγγίζεται αξιοποιώντας τις ιδιότητες των πολύγωνων Voronoi και πιο συγκεκριμένα με την κεντροειδή διαμέριση Voronoi (CVT), μεθοδολογίες οι οποίες αναλύονται διεξοδικά.

Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την προτεινόμενη μεθοδολογία επιλογής των βέλτιστων θέσεων χωροθέτησης αισθητήρων.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** προσεγγίζεται η μεθοδολογία αξιολόγησης της χωροθέτησης, κάνοντας χρήση του τριγωνισμού Delaunay, ο οποίος αποτελεί ουσιαστικά το δυικό γράφημα του διαγράμματος Voronoi.

Αρχικά αναλύεται η σημασία της αξιολόγησης της λύσης, σε προβλήματα βελτιστοποίησης. Εξετάζονται πιθανές μετρικές¹ οι οποίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της χωροθέτησης ενός ασύρματου δικτύου γεωαισθητήρων. Καταγράφονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε μίας μετρικής από τα οποία και προκρίνεται η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης των πλευρών των τριγώνων που δημιουργούνται στο δίκτυο, ως η πλέον κατάλληλη.

Στη συνέχεια αναπτύσσεται η θεωρία γύρω από τον τριγωνισμό Delaunay και οι ιδιότητες του.

Στο τέλος του κεφαλαίου αναλύεται ο προτεινόμενος αλγόριθμος αξιολόγησης.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται το λογισμικό το οποίο δημιουργήθηκε με σκοπό τη διαδικασία χωροθέτησης και αξιολόγησης του ασύρματου δικτύου γεωαισθητήρων, χρησιμοποιώντας το «ολοκληρωμένο μαθηματικό λογισμικό» Matlab.

¹ Με τον όρο μετρική, νοείται το χαρακτηριστικό ή η παράμετρος με την οποία αξιολογείται η αποδοτικότητα ή η επίδοση της λύσης ενός προβλήματος

Στο κεφάλαιο αυτό εξηγείται πλήρως η διαδικασία λειτουργίας του λογισμικού και οι παράμετροι εισαγωγής που απαιτούνται προκειμένου να ολοκληρωθεί η διαδικασία της χωροθέτησης του δικτύου και αξιολόγησής του.

Το λογισμικό παρέχει στο χρήστη, τόσο με τη μορφή εικόνας, όσο και με τη μορφή πινάκων τα αποτελέσματα της χωροθέτησης του δικτύου, αλλά και τους στατιστικούς δείκτες που σχετίζονται με την γεωγραφική κάλυψη και την αξιολόγηση του δικτύου και αναπτύχθηκαν θεωρητικά στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Ο τρόπος με τον οποίο έχει δομηθεί το λογισμικό δίνει δυνατότητα στο χρήστη να «τρέξει» είτε πραγματικά δεδομένα, είτε σενάρια προσομοίωσης με παραμέτρους της επιλογής του.

Τα στατιστικά στοιχεία και δείκτες που δίνονται ως τελικό προϊόν, παρέχουν τη δυνατότητα ανατροφοδότησης του συστήματος με νέες παραμέτρους και σύγκριση των λύσεων, τόσο ως προς την κάλυψη, όσο και ως προς την οικονομικά αποδοτικότερη.

Η διαδικασία της βέλτιστης χωροθέτησης και της αξιολόγησής της, θα ήταν αδύνατη χωρίς την ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού. Οι ρουτίνες και οι επαναλήψεις που απαιτούνται, καθώς και η διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων θέτουν ως «μονόδρομο» την ανάπτυξη αντίστοιχου κώδικα για την υλοποίησή τους.

Προκειμένου να εξετασθεί η λειτουργία και η αποδοτικότητα του αλγορίθμου χωροθέτησης και αξιολόγησης, δημιουργούνται διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης και πραγματοποιούνται δοκιμές με διαφορετικές παραμέτρους, ενώ εξετάζονται και ειδικές περιπτώσεις χωροθέτησης και καταγράφονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα σενάρια αυτά.

Στο **πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Βασικό συμπέρασμα της διδακτορικής διατριβής είναι, ότι η συγκεκριμένη μεθοδολογία χωροθέτησης και αξιολόγησης ενός ασύρματου δικτύου γεωαισθητήρων σε οποιοδήποτε περιβάλλον είναι αποδοτική, πλήρως παραμετροποιήσιμη και αξιόπιστη.

Με γνώμονα την ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης και συντήρησης του δικτύου, ζητούνται οι καλύτερες θέσεις αυτών, μεταξύ των υποψηφίων θέσεων τοποθέτησης, ώστε να επιτυγχάνεται η πλήρης κάλυψη της περιοχής με γεωμετρία που να πλησιάζει όσο είναι δυνατόν την ιδανική (ισόπλευρα τρίγωνα).

Η πρωτοτυπία της διατριβής στη χωροθέτηση και αξιολόγηση ασύρματων δικτύων γεωαισθητήρων, έγκειται στα κάτωθι:

- Προτείνεται ολοκληρωμένη διαδικασία χωροθέτησης ασύρματων δικτύων αισθητήρων και γεωαισθητήρων αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα της κεντροειδούς διαμέρισης Voronoi (CVT). Το πρόβλημα προσεγγίζεται όχι με κάποιον ευρετικό αλγόριθμο, αλλά με εφαρμογή μεθόδων υπολογιστικής γεωμετρίας. Η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιείται για πρώτη φορά σε προβλήματα γεωγραφικής κάλυψης ασύρματων δικτύων αισθητήρων με περιορισμούς ως προς τις θέσεις τοποθέτησης.
- Αναπτύσσεται ολοκληρωμένη διαδικασία αξιολόγησης της λύσης χωροθέτησης, στο κατά πόσο αυτή προσεγγίζει την ιδανική/επιθυμητή γεωμετρία, για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, μέσω μεθόδων υπολογιστικής γεωμετρίας (τριγωνισμός Delaunay). Στο πλαίσιο της διαδικασίας αξιολόγησης, προτείνεται συγκεκριμένη μετρική για την αξιολόγηση του δικτύου.
- Δημιουργείται λογισμικό το οποίο ενσωματώνει τις παραπάνω λειτουργίες χωροθέτησης και αξιολόγησης. Δίνει δυνατότητα πλήρους παραμετροποίησης των επιλογών για την εύρεση της βέλτιστης κάθε φορά λύσης, ενώ δίνει τη δυνατότητα επεξεργασίας τόσο πραγματικών δεδομένων, όσο και τυχαίων δεδομένων που έχουν προκύψει από προσομοίωση.

DEVELOPMENT OF METHODOLOGIES FOR THE DEPLOYMENT AND THE EVALUATION OF WIRELESS SENSOR NETWORKS USING COMPUTATIONAL GEOMETRY ALGORITHMS

Abstract

In recent years, Wireless Sensor Networks and GeoSensor Networks (WSN and GSN) have rapidly evolved and now comprise a powerful tool in monitoring and observation of the natural environment, among other fields. The use of WSNs is critical in early warning systems, which are in high importance today.

The optimum deployment of sensors is a multi-dimensional problem, which has two main components; network and positioning approach. In some cases, it is hard or even impossible to achieve perfect geometry in nodes' deployment. The ideal and desirable scenario of nodes arranged in square or hexagonal grid would raise extremely the cost of the network, especially in unfriendly or hostile environments. In such environments the positions of the sensors have to be chosen among a list of possible points, which in most cases are randomly distributed. This constraint has to be taken under consideration during the WSN planning. Full geographical coverage is in some applications of the same, if not of greater importance than the network coverage. Cost is a crucial factor in network planning and given that resources are often limited, what matters, is to cover the whole area with the minimum number of sensors.

In this PhD thesis a new methodology for sensor deployment and evaluation of the geometry of WNS is developed. The proposed methodology can be applied in any application, in which a WSN is required, with or without limitations to the positioning of the sensors, such as a fire detection WSN in a forest area or an extensive network for detecting deformations.

The thesis consists of **five chapters**.

The first chapter presents the relatively new science of WSNs and geosensorics, as well as the most important historical landmarks in the evolution of WSNs and WSNs. For better understanding, definitions and basic concepts are given regarding the use of these instruments as a means for detection and monitoring of natural and artificial environment.

There is also an extensive reference made to the way a WSN is operating, along with the typical parts and characteristics of a sensor. Thus the particularities, advantages and disadvantages of a WSN become more

understandable. The parameters of evaluating such networks are also analyzed. These parameters are critical to the selection of the appropriate sensor, depending on the application requirements. To understand the need of using WSNs, applications from different scientific fields are given.

At the end of the first chapter the different connection topologies are analyzed along with the evaluation of their advantages and disadvantages.

In **the second chapter** the optimal deployment problem of a WSN is described. An introduction to the computational geometry and its application fields is made. The solution is approached by using the properties of Voronoi Diagrams (VD) and more specifically, the Centroidal Voronoi Tessellation (CVT). The theoretical background for both VD and CVT is given, before the proposed methodology is thoroughly explained.

In **the third chapter** the evaluation method of the deployment of a WSN is approached, using the Delaunay triangulation, which is the dual graph of the Voronoi diagram.

Initially, the importance of the evaluation in optimization problems is discussed, while potential metrics which could be used for evaluating the deployment of a WSN are written down. The advantages and disadvantages of each metric are recorded. Finally the mean value of the standard deviations of the edges of each triangle that form the WSN is finally selected.

Then the theoretical background for the Delaunay triangulation and its properties is given, before the proposed evaluation algorithm is analyzed and explained at the end of the chapter.

The fourth chapter presents the software created for the proposed deployment and evaluation methodologies of a WSN using the computing environment Matlab.

In this chapter the software, the input parameters that are required to complete the deployment of the sensors and the evaluation of the network are explained.

The software provides the user with the results of the deployment both as an image and in tables, along with statistical indexes related to geographical coverage and evaluation of the network.

The way the software is built allows the user to "run" either actual data or simulation scenarios with parameters of his choice.

Statistics and indexes are given as the final product, enabling the feedback of the system with new parameters and comparison of the solutions, both in terms of coverage, as well as to more cost-effective deployment.

The processes of the deployment and the evaluation, would be impossible without the development of appropriate software. The routines and repetitions that are required and the management of large dataset, set as "a must" the development of appropriate code for their implementation.

In order to examine the functioning and the efficiency of the algorithm, different simulation scenarios were created and tests with different parameters were conducted. Special occasions of deployment are also faced. The findings of all these scenarios are recorded and analyzed.

In the fifth and final chapter the conclusions of the research are presented and recommendations for future work are made.

The main conclusion of the thesis is that the specific deployment and evaluation methodologies for WSNs and GSNs in any environment is efficient, fully customizable and reliable.

With criterion the minimizing of the cost of the installation and the maintenance of the network, the optimum positions among all the candidate ones are searched, in order to achieve full coverage of the area with geometry that is as close as possible to the ideal one (equilateral triangles).

The innovation of the thesis in deployment and evaluation of wireless sensor networks lies in the following:

- An integrated methodology for the deployment of sensors in wireless sensor networks and geosensor networks is proposed, exploiting the advantages of the **Centroidal Voronoi Tessellation (CVT)**. The solution is approached by applying computational geometry techniques. This technique is first used in problems of geographical coverage of WSNs with restrictions on deployment positions.
- An integrated methodology for evaluating deployment positions is developed. It is based on whether these positions approximate the ideal/desired geometry, for the parameters given, through computational geometry methods (**Delaunay Triangulation**). For the evaluation process, a specific metric is proposed.
- A software which incorporates the above deployment and evaluation methodologies is created. It enables full customization of options for

finding the optimal position for each scenario, and but also the processing of both, real and random data, obtained from simulation.

Σχήματα

Σχήμα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας ενός GSN.....	9
Σχήμα 1.2: Τυπικά μέρη ενός γεωαισθητήρα	10
Σχήμα 1.3: Εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων (Yick, Mukherjee, & Ghosal, 2008)	26
Σχήμα 1.4: Πεδία εφαρμογών των WSN ανάλογα με την κλίμακα του χώρου και την πυκνότητα των κόμβων (Δούκας, 2014)	27
Σχήμα 1.5: Αναπαράσταση GSN για ανίχνευση μικρομετακινήσεων (http://fiji.eecs.harvard.edu/ , 2015).....	28
Σχήμα 1.6: Τοπολογία αρτηρίας.....	38
Σχήμα 1.7: Τοπολογία δακτυλίου	39
Σχήμα 1.8: Τοπολογία πολλαπλών κόμβων	40
Σχήμα 1.9: Τοπολογία δέντρου	42
Σχήμα 1.10: Τοπολογία πλέγματος.....	43
Σχήμα 1.11: Τοπολογία fully connected	44
Σχήμα 1.12: Τοπολογία τριγώνου.....	45
Σχήμα 1.13: Τοπολογία αστέρα - κυψέλης	46
Σχήμα 1.14: Τοπολογία κυψέλης με επικαλύψεις (Κολεγά, 2014).....	47
Σχήμα 1.15: Κατανομή κόμβων ενός GSN.....	48
Σχήμα 2.1: Χωροθέτηση με βάση πολύγωνα Voronoi (α) και ιδανικές θέσεις που προκύπτουν από δημιουργία CVT (β).....	54
Σχήμα 2.2: Χωροθέτηση αισθητήρων με βάση τις εμβέλεις ανίχνευσης και επικοινωνίας.....	56
Σχήμα 2.3: Χωροθέτηση αισθητήρων με εξάγωνα αποτελούμενα από ισοσκελή τρίγωνα.....	57
Σχήμα 2.4: Χωροθέτηση αισθητήρων με τριγωνισμό Delaunay	58
Σχήμα 2.5: Χωροθέτηση αισθητήρων με ισόπλευρα και ισοσκελή τρίγωνα	58
Σχήμα 2.6: Βασικές έννοιες διαγράμματος Voronoi	65
Σχήμα 2.7: "Μη κανονική" διαμέριση του χώρου με πολύγωνα Voronoi	67
Σχήμα 2.8: Διαφορά μεταξύ ενός VD και ενός CVT	69
Σχήμα 2.9: Δύο διαφορετικά CVT του ίδιου χώρου	71
Σχήμα 2.10: Το ιδανικό CVT	71
Σχήμα 2.11: Διάγραμμα ροής αλγόριθμου Lloyd για κατασκευή CVT.....	74
Σχήμα 2.12: Κατασκευή CVT με τον αλγόριθμο του Lloyd, μετά την 1η, 2η, 3η και 15η επανάληψη	75
Σχήμα 2.13: Διαφορά μεταξύ κυρτού και μη κυρτού πολυγώνου	77
Σχήμα 2.14: Προσδιορισμός ελάχιστου αριθμού αισθητήρων	79

Σχήμα 2.15: Διαφορά μεταξύ ευκλείδειας απόστασης και απόστασης Manhattan	81
Σχήμα 2.16: Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας χωροθέτησης.....	82
Σχήμα 3.1: Δημιουργία TIN από τις τελικές θέσεις εγκατάστασης.....	86
Σχήμα 3.2: Η κλίμακα του D. (Taylor, 1977)	90
Σχήμα 3.3: Σύγκριση της τυπικής απόκλισης πλευρών διαφόρων τριγώνων	92
Σχήμα 3.4: Κανονικός τριγωνικός κανάβος.....	93
Σχήμα 3.5: Επικάλυψη κανονικού τριγωνικού κανάβου με TIN.....	94
Σχήμα 3.6: Τριγωνισμοί του ίδιου σημειοσυνόλου (Devadoss & O' Rourke, 2011)	97
Σχήμα 3.7: Αντιστροφή μη επιτρεπτής ακμής (de Berg, Cheong, van Kreveld, & Overmars, 2008)	98
Σχήμα 3.8: Διάγραμμα Voronoi και ο αντίστοιχος τριγωνισμός Delaunay ...	99
Σχήμα 3.9: CVT και τριγωνισμός Delaunay στις θέσεις εγκατάστασης.....	100
Σχήμα 4.1: Βασική οθόνη του λογισμικού OptEval.....	105
Σχήμα 4.2: Επιλογές εμφάνισης στο πλαίσιο γραφικών	106
Σχήμα 4.3: Δομή αρχείου εισαγωγής.....	107
Σχήμα 4.4: Εμφάνιση σημείων και εξωτερικού περιγράμματος.....	107
Σχήμα 4.5: Εισαγωγή παραμέτρων CVT	108
Σχήμα 4.6: Πολύγωνα CVT, θεωρητικές και τελικές θέσεις εγκατάστασης.....	109
Σχήμα 4.7: Απεικόνιση επιβλεπόμενων και μη επιβλεπόμενων σημείων....	110
Σχήμα 4.8: Πίνακας διαχείρισης συντεταγμένων.....	111
Σχήμα 4.9: Πλαίσιο στατιστικών αξιολόγησης.....	111
Σχήμα 4.10: Διάγραμμα συχνοτήτων τυπικών αποκλίσεων	112
Σχήμα 4.11: Παράμετροι των σεναρίων μελέτης	113
Σχήμα 4.12: Χωροθέτηση για 2000 (α , γ) & 5000 (β , δ) σημεία, με R=20m και N=270	114
Σχήμα 4.13: Ποσοστιαία κάλυψη περιοχής μελέτης για R = 20m.....	115
Σχήμα 4.14: Ποσοστιαία κάλυψη περιοχής μελέτης για R = 30m.....	115
Σχήμα 4.15: Ποσοστιαία κάλυψη περιοχής μελέτης για R = 40m.....	116
Σχήμα 4.16: Γεωμετρική αξιολόγηση του δικτύου για R = 20m.....	118
Σχήμα 4.17: Γεωμετρική αξιολόγηση του δικτύου για R = 30m.....	118
Σχήμα 4.18: Γεωμετρική αξιολόγηση του δικτύου για R = 40m.....	119
Σχήμα 4.19: Περίπτωση μελέτης με ζώνη επιρροής 75m	120
Σχήμα 4.20: Χωροθέτηση σε ζώνη 75m, με R=30m, N=140 και $\rho=20$	121
Σχήμα 4.21: Τριγωνισμός Delaunay σε περιοχή με ζώνη επιρροής	122
Σχήμα 4.22: Περίπτωση μελέτης με κενά εντός της περιοχής.....	123

Σχήμα 4.23: Χωροθέτηση σε περιοχή με 4 κενές ζώνες, με $R=30m$, $N=350$ και $\rho=20$	124
Σχήμα 4.24: Τριγωνισμός Delaunay σε περιοχή με κενές ζώνες.....	125
Σχήμα 5.1: Τριγωνισμός Delaunay το χώρο των τριών διαστάσεων.....	133

Πίνακες

Πίνακας 1.1: Κατηγορίες, πεδία έρευνας και εφαρμογές για κάθε είδος WNS (Yick, Mukherjee, & Ghosal, 2008).....	23
Πίνακας 1.2: Αξιολόγηση προτεινόμενων τοπολογιών.....	51
Πίνακας 2.1: Ο αλγόριθμος του Lloyd	74
Πίνακας 3.1: Αξιολόγηση προτεινόμενων μετρικών	96
Πίνακας 4.1: Παράμετροι των σεναρίων μελέτης.....	113
Πίνακας 4.2: Δείκτες αξιολόγησης δικτύου σε περιοχή με ζώνη επιρροής .	122
Πίνακας 4.3. Δείκτες αξιολόγησης δικτύου σε περιοχή με κενές ζώνες.....	125

Εικόνες

Εικόνα 1.1: Σήμερα τα GSN βρίσκονται παντού	8
Εικόνα 1.2: Προσδιορισμός παραμορφώσεων με ολοκληρωμένο γεωδαιτικό σταθμό	30
Εικόνα 1.3: Αισθητήρες οπτικών ινών για μέτρηση παραμορφώσεων.....	30
Εικόνα 1.4: Γεωαισθητήρες για ανίχνευση πυρκαγιών	32
Εικόνα 1.5. Εύρεση της διαδρομής με τους λιγότερους ρύπους.....	34
Εικόνα 1.6: MMM εφοδιασμένα με γεωαισθητήρες	34
Εικόνα 1.7: Στιγμιότυπο από λογισμικό παρακολούθησης στόλου.....	36
Εικόνα 1.8: Παρακολούθηση σοδειάς με GSN.....	37
Εικόνα 2.1: Λογισμικό χωροθέτησης αισθητήρων	55
Εικόνα 2.2: Χωροθέτηση αξιοποιώντας το DTM της περιοχής μελέτης	59
Εικόνα 2.3: Πρωτότυπο κινητού ασύρματου αισθητήρα	60
Εικόνα 2.4: Η χρήση των πολυγώνων Voronoi από τον Καρτέσιο	63
Εικόνα 2.5: Ο χάρτης εξάπλωσης ασθένειας του Snow	64
Εικόνα 2.6: Λάκκοι αναπαραγωγής ψαριού tilapia	67
Εικόνα 2.7: Giant's Causeway (Ιρλανδία).....	68

Ακρωνύμια

ADC	Analog to Digital Converter
ARPANET	Advanced Research Projects Agency Network
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
CDT	Constrained Delaunay Triangulation
CVT	Centroidal Voronoi Tessellation
DARPA	Defence Advanced Research Projects Agency
DSN	Distributed Sensor Network
DSP	Digital Signal Processors
DVS	Dynamic Voltage Scaling
FIRE	Future Internet Research and Experimentation
FPGA	Field Programmable Gate Array
G/W	GateWay
GIS	Geographic Information Systems
GPS	Global Positioning System
GSN	GeoSensor Network
Kbps	Kilobits per second
MEMS	MicroElectroMechanical Systems
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NNS	Nearest Neighbor Search
QoS	Quality of Service
RF	Radio Frequency
SOSUS	Sound Surveillance System
TIN	Triangulated Irregular Network
VD	Voronoi Diagram
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Network

Συμβολισμοί²

R_s, r_s	Ακτίνα/Εμβέλεια ανίχνευσης του αισθητήρα
r_c	Ακτίνα επικοινωνίας του αισθητήρα
Ω	Ανοιχτό σύνολο του \mathbb{R}^N
$\{V_i\}_{i=1}^k$	Διαμέριση του Ω
$\bar{\Omega}$	Κλειστό σύνολο του \mathbb{R}^N
\hat{V}_i	Πολύγωνο Voronoi
p_i, z_i	Εστία πολυγώνου Voronoi
q_i	Κόμβος πολυγώνου Voronoi
C_i	Ο μέγιστος κενός κύκλος του κόμβου q_i
ρ	Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας
z^*	Το κέντρο βάρους μιας περιοχής μιας περιοχής $V \subset \mathbb{R}^N$
W	Ένα σύνολο διακριτών σημείων, ορισμένων στο \mathbb{R}^N
ℓ^2	Η Ευκλείδεια νόρμα (απόσταση σημείων σε 2 διαστάσεις)
x_i, y_i	Οι καρτεσιανές συντεταγμένες του σημείου i
N_{\min}	Ο ελάχιστος απαιτούμενος αριθμός αισθητήρων για την κάλυψη της περιοχής μελέτης
N	Ο αριθμός αισθητήρων που επιλέγεται για την κάλυψη της περιοχής μελέτης
D	Ο δείκτης Clark – Evans για έλεγχο χωρικής κατανομής
R	Η πλευρά ενός ισοπλεύρου τριγώνου
α, β, γ	Οι πλευρές ενός τυχαίου τριγώνου
E	Το εμβαδόν τριγώνου
Π	Η περίμετρος τριγώνου
\hat{x}	Η μέση τιμή των πλευρών ενός τριγώνου
σ_0	Η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής των πλευρών ενός τριγώνου

² Καταγράφονται με τη σειρά εμφάνισής τους στο κείμενο

u	Η διαφορά κάθε πλευράς του τριγώνου, από τη μέση τιμή
$\overline{\sigma_0}$	Η μέση τιμή των τυπικών αποκλίσεων των πλευρών κάθε επιμέρους τριγώνου
g	Ο δείκτης $\overline{\sigma_0}/R_s$
S	Μεγιστιαία επίπεδη υποδιαίρεση κατά τον τριγωνισμό ενός συνόλου σημείων P .
\mathcal{T}	Ο τριγωνισμός ενός συνόλου σημείων P
$A(\mathcal{T})$	Το γωνιοδιάνυσμα του \mathcal{T}
$e = \overline{p_i p_j}$	Μία ακμή ενός τριγωνισμού \mathcal{T} του P

Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια η επιστήμη της πληροφορικής έχει αναπτυχθεί ραγδαία. Επακόλουθο ήταν να εξελίσσεται συνεχώς και η τεχνολογία των κάθε λογής αισθητήρων. Η οργάνωση των μεμονωμένων αισθητήρων σε δίκτυα, έδωσε τη δυνατότητα όχι μόνο να συλλέγεται όγκος πληροφορίας που ποτέ πριν δεν ήταν δυνατόν, αλλά κυρίως η πληροφορία αυτή να είναι διαθέσιμη για επεξεργασία ακόμη και σε πραγματικό χρόνο.

Αν και η τεχνολογία των αισθητήρων για μέτρηση φυσικών μεγεθών εφαρμόζεται εδώ και αρκετά χρόνια, το πεδίο των ασύρματων δικτύων αισθητήρων σε ευρεία κλίμακα άρχισε να ερευνάται σχετικά πρόσφατα. Σε αυτό συνετέλεσαν ανάμεσα στα άλλα και το συνεχώς μειούμενο μέγεθος και κόστος των αισθητήρων, αλλά και η τεχνολογία των ηλεκτρικών συσσωρευτών (μπαταριών).

Παράλληλα, η καθολική εξάπλωση του διαδικτύου, η ευκολία πρόσβασης σε αυτό και κυρίως η ύπαρξη ψηφιακών χαρτογραφικών υποβάθρων για κάθε σημείο της γης, επιτρέπει την αναπαράσταση των μετρούμενων μεγεθών, σε χάρτες και διαγράμματα ακόμη και σε πραγματικό χρόνο. Η πληροφορία σχετικά με την τιμή ενός παρατηρούμενου μεγέθους αποκτά μεγαλύτερη σημασία αν παρέχεται την ίδια στιγμή και η αντίστοιχη πληροφορία σχετικά με τη θέση της μέτρησης. Έτσι, πλέον δεν έχει νόημα να μιλάμε για αισθητήρες, αλλά για γεωαισθητήρες. Συσκευές, δηλαδή, που η πληροφορία που παρέχουν είναι γεωαναφερμένη σε δύο ή σε τρεις διαστάσεις.

Δεδομένου ότι η ακτίνα μέσα στην οποία ένας γεωαισθητήρας μπορεί να ανιχνεύει ή να μετρά το επιθυμητό μέγεθος είναι σχετικά περιορισμένη, η επόμενη μεγάλη πρόκληση ήταν η οργάνωση των γεωαισθητήρων σε δίκτυα, κατάλληλα κατανομημένα στο χώρο ώστε να παρέχουν πλήρη κάλυψη της περιοχής μελέτης, χρησιμοποιώντας τον ελάχιστο δυνατό αριθμό δεκτών.

Μέχρι σήμερα, έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι τοποθέτησης/εγκατάστασης των κόμβων ενός ασύρματου δικτύου γεωαισθητήρων (Toumpis & Tassioulas, 2006), (Wang, Hu, & Tseng, 2005), (Zhang & Zhou, 2012), (Kolega & Vescoukis, 2013). Παρόλ' αυτά οι περισσότεροι αφορούν σε εφαρμογές μικρής κλίμακας, όπου οι θέσεις τοποθέτησης είναι συγκεκριμένες και προσβάσιμες, ενώ ο αριθμός των γεωαισθητήρων είναι μικρός (της τάξης των δεκάδων) και εύκολα ελεγχόμενος.

Σε ότι αφορά εφαρμογές ευρείας κλίμακας, το ίδιο το φυσικό περιβάλλον είναι αυτό που επιβάλλει περιορισμούς. Ο αριθμός των αισθητήρων που απαιτούνται για την πλήρη κάλυψη της περιοχής μελέτης είναι εξαιρετικά μεγάλος, ενδεχομένως και της τάξης των χιλιάδων. Ένας κακός προγραμματισμός στη σχεδίαση του δικτύου θα οδηγήσει είτε σε ελλιπή κάλυψη της περιοχής (λόγω υποεκτίμησης του αριθμού των αισθητήρων), είτε σε υπερβολικά μεγάλο κόστος (λόγω υπερεκτίμησης του αριθμού τους), γεγονός που υποβαθμίζει την ποιότητα της όποιας εφαρμογής.

Επιπλέον δυσκολίες δημιουργούνται στην εγκατάσταση των αισθητήρων. Σε ένα ιδανικό σενάριο οι αισθητήρες θα έπρεπε να είναι ομοιόμορφα κατανομημένοι σε ολόκληρη την περιοχή μελέτης, τοποθετημένοι σε κανονική γεωμετρική διάταξη (πχ τριγωνικό πλέγμα). Όμως, σε μεγάλες εκτάσεις (π.χ. δάση, πρανή), οι θέσεις τοποθέτησης καθορίζονται αποκλειστικά από τη μορφολογία του εδάφους και την φυσική χωρική κατανομή των δυνατών θέσεων τοποθέτησης (πχ χωρική κατανομή των δένδρων) και όχι τόσο από την θεωρητικά επιθυμητή γεωμετρία του δικτύου. Επίσης, η εφικτότητα της οποιασδήποτε τοποθέτησης εξαρτάται από τις επικρατούσες φυσικές συνθήκες, γεγονός, ασφαλώς, εκτός εμβέλειας της παρούσης διατριβής.

Είναι πρακτικά αδύνατο η τοποθέτηση μερικών χιλιάδων αισθητήρων να γίνει σε προεπιλεγμένες θέσεις που καθορίζονται από μια τέλεια κανονική γεωμετρία (π.χ. σε μορφή τετραγωνικού ή εξαγωνικού κανάβου). Η τοποθέτησή τους στην πράξη μπορεί να γίνει σε κάποιες από τις ήδη υπάρχουσες θέσεις (για παράδειγμα, σε ένα δάσος, στις θέσεις που βρίσκονται τα δέντρα).

Για τις περιπτώσεις αυτές έχουν αναπτυχθεί ευρετικοί αλγόριθμοι για την εύρεση της λύσης τοποθέτησης (Κολεγά, 2014), (Aitsaabi, Achir, Boussetta, & Pujolle, 2008). Ένας ευρετικός αλγόριθμος δίνει μια λύση από ένα σύνολο πιθανών λύσεων, σε μικρό χρονικό διάστημα, αλλά δεν εξασφαλίζει ότι είναι η καλύτερη δυνατή.

Αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα, αυτό της χωροθέτησης ασύρματων δικτύων γεωαισθητήρων τα οποία προορίζονται για λειτουργία σε αφιλόξενα φυσικά περιβάλλοντα ευρείας κλίμακας. Επιπλέον, προτείνεται και μια μεθοδολογία αξιολόγησης της λύσης χωροθέτησης, ώστε να είναι δυνατή η εκ των προτέρων αξιολόγηση του δικτύου, από απόψεως γεωμετρίας και η ανατροφοδότηση του συστήματος με νέες παραμέτρους (π.χ. διαφορετικό αριθμό ή/και εμβέλεια αισθητήρων) για τη δημιουργία διαφορετικών σεναρίων και σύγκριση αυτών μεταξύ τους.

Η πρωτοτυπία της διατριβής στη χωροθέτηση και αξιολόγηση ασύρματων δικτύων γεωαισθητήρων, έγκειται στα κάτωθι:

- Προτείνεται ολοκληρωμένη διαδικασία χωροθέτησης ασύρματων δικτύων αισθητήρων και γεωαισθητήρων αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα της κεντροειδούς διαμέρισης Voronoi (CVT). Το πρόβλημα προσεγγίζεται όχι με κάποιον ευρετικό αλγόριθμο, αλλά με εφαρμογή μεθόδων υπολογιστικής γεωμετρίας. Η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιείται για πρώτη φορά σε προβλήματα γεωγραφικής κάλυψης ασύρματων δικτύων αισθητήρων και γεωαισθητήρων.
- Αναπτύσσεται ολοκληρωμένη διαδικασία αξιολόγησης της λύσης χωροθέτησης, στο κατά πόσο αυτή προσεγγίζει την ιδανική/επιθυμητή γεωμετρία, για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, μέσω μεθόδων υπολογιστικής γεωμετρίας (τριγωνισμός Delaunay). Στο πλαίσιο της διαδικασίας αξιολόγησης, προτείνεται συγκεκριμένη μετρική για την αξιολόγηση του δικτύου.
- Δημιουργείται λογισμικό το οποίο ενσωματώνει τις παραπάνω λειτουργίες χωροθέτησης και αξιολόγησης. Δίνει δυνατότητα πλήρους παραμετροποίησης των επιλογών για την εύρεση της βέλτιστης κάθε φορά λύσης, ενώ δίνει τη δυνατότητα επεξεργασίας τόσο πραγματικών δεδομένων, όσο και τυχαίων δεδομένων που έχουν προκύψει από προσομοίωση.

Η απαίτηση για υψηλή χωρική πυκνότητα³ κόμβων (αισθητήρων) σε εφαρμογές εκτεταμένου πεδίου, οδηγεί στη σχεδίαση δικτύων με χιλιάδες κόμβους, τα οποία προορίζονται για εγκατάσταση σε περιβάλλοντα όπου καμία πηγή ενέργειας δεν μπορεί να θεωρείται διαθέσιμη, τόσο για λόγους κόστους, όσο και εξ αιτίας φυσικών περιορισμών (π.χ. επικινδυνότητα εδάφους, φύλλωμα δέντρων κ.ά.).

Επιπλέον των περιορισμών που προαναφέρθηκαν, η ταχύτητα της εξέλιξης των φυσικών φαινομένων που παρατηρούνται από τέτοια δίκτυα, μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα αναδιοργάνωσης του δικτύου (π.χ. μετακινήσεις πρανών, σεισμική δραστηριότητα, πυρκαγιά).

Η διατριβή καταπιάνεται με το πρόβλημα χωροθέτησης και αξιολόγησης ασύρματων δικτύων γεωαισθητήρων. Η προσέγγιση του θέματος είναι

³ Ως χωρική πυκνότητα κόμβων ή σημείων, νοείται ο αριθμός των κόμβων (αισθητήρων) ή σημείων, ανά μονάδα επιφάνειας.

συστηματική και τόσο σε θεωρητικό επίπεδο, όσο και σε επίπεδο ανάπτυξης, έχει λάβει υπόψη τη σχετικά περιορισμένη βιβλιογραφία, καθώς το πεδίο της χωροθέτησης ασύρματων δικτύων γεωαισθητήρων σε ευρείας κλίμακας εφαρμογές με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, παραμένει σχετικά ανεξερεύνητο.

Η έρευνα που έγινε εισάγει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση του προβλήματος, η οποία περιλαμβάνει στοιχεία από την επιστήμη της γεωδαισίας, όσο και από την επιστήμη της γεωμετρίας. Συνδυάζονται αλγόριθμοι και θεωρία από την επιστήμη της υπολογιστικής γεωμετρίας. Η κύρια συμβολή της εντοπίζεται στην πρόταση ενός ολοκληρωμένου μεθοδολογικού πλαισίου, χρήσιμου στη σχεδίαση και εκ των προτέρων αξιολόγηση ασύρματων δικτύων γεωαισθητήρων ευρείας κλίμακας σε αφιλόξενα φυσικά περιβάλλοντα, το οποίο συνδυάζει τεχνικές από διαφορετικές επιστημονικές περιοχές.

Αν και οι γεωαισθητήρες αποτελούν υποκατηγορία των αισθητήρων και με δεδομένο ότι τα ασύρματα δίκτυα αποτελούν έναν από τους δυνατούς τρόπους σύνδεσης και επικοινωνίας των τελευταίων, όπου γίνεται αναφορά στο εξής σε δίκτυα αισθητήρων, θα νοούνται ως ασύρματα δίκτυα γεωαισθητήρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Περί γεωαισθητήρων και ασύρματων δικτύων γεωαισθητήρων

1.1 Ορισμοί

Αισθητήρας (sensor): Είναι κάθε συσκευή που μετρά μια φυσική ποσότητα και κατόπιν τη μετατρέπει σε ένα αναγνώσιμο (από ένα παρατηρητή ή από ένα όργανο) σήμα (signal). Με απλούστερα λόγια, ένας αισθητήρας είναι μια συσκευή που λαμβάνει ένα σήμα και ανταποκρίνεται σε αυτό. (Δούκας, 2014)

Ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (WSN): Ένα σύνολο αισθητήρων, οι οποίοι έχουν δυνατότητα να επικοινωνούν ασύρματα μεταξύ τους, αλλά και με κάποια υπολογιστική μονάδα στην οποία επεξεργάζονται οι πληροφορίες.

Γεωαισθητήρας: (geosensor): Ένας αισθητήρας, που εκτός από το φυσικό μέγεθος το οποίο μετρά, μπορεί να προσδιορίζει και τη θέση του σε κάποιο σύστημα συνταγμένων ή αυτή είναι εκ των προτέρων γνωστή. Η ταχύτατη εξάπλωση των γεωαισθητήρων έχει οδηγήσει στην εμφάνιση μιας νέας επιστήμης, που καλείται “Geosensorics”. (Δούκας, 2014)

Δίκτυο γεωαισθητήρων (GSN): Πρόκειται για υποσύνολο των WNS. Είναι δίκτυο, αποτελούμενο από γεωαισθητήρες, κατανεμημένους στο χώρο, οι οποίοι παρακολουθούν και καταγράφουν φυσικά φαινόμενα, με έμφαση όχι μόνο στην καταγραφή της τιμής του φαινομένου, αλλά και στη θέση του. Στο δίκτυο αυτό υπάρχει υποδομή επικοινωνίας, τόσο μεταξύ τους, όσο και με μια κεντρική μονάδα ανάλυσης και επεξεργασίας. (Δούκας, 2014), (Nittel, 2009)

Τοπολογία δικτύου (network topology): Ορίζεται η μορφή της δικτυακής σύνδεσης και επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων (αισθητήρων) ενός δικτύου. Θεωρείται ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας σε ότι αφορά την αξιοπιστία του δικτύου, την ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων, αλλά και τη διάρκεια ζωής του. (Κολεγά, 2014)

1.2 Η ιστορική εξέλιξη των δικτύων γεωαισθητήρων

Για να αποκτήσει κανείς βαθύτερη αίσθηση της πρακτικής αξίας των ασύρματων δικτύων αισθητήρων και γεωαισθητήρων, κρίνεται σκόπιμο να ακολουθήσει τα ίχνη τους από τα πρώτα χρόνια εφαρμογής τους, σταχυολογώντας όλα εκείνα τα εξελικτικά στοιχεία που τους έφεραν στη σημερινή τους μορφή.

Όπως οι περισσότερες τεχνολογικές καινοτομίες, έτσι και τα δίκτυα αισθητήρων γεννήθηκαν μέσα από στρατιωτικές εφαρμογές. Τα πρώτα λοιπόν δίκτυα αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου από τις ΗΠΑ. Ένα από αυτά ήταν ένα σύστημα παρακολούθησης ήχου, το SOSUS. Το εν λόγω σύστημα αποτελούνταν από ένα σύνολο υποθαλάσσιων αισθητήρων ήχου, για την παρακολούθηση των Σοβιετικών υποβρυχίων. Μερικοί από τους αισθητήρες της συγκεκριμένης τεχνολογίας, χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα για την παρακολούθηση της υποθαλάσσιας πανίδας αλλά και πιθανής σεισμικής δραστηριότητας (Nack, 2009).

Η ώθηση για τις έρευνες σχετικά με τα δίκτυα αισθητήρων δόθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Αφορμή στάθηκαν κυρίως οι επενδύσεις που έγιναν τις δεκαετίες του 1960 και του 1970 στον πρόγονο του σημερινού διαδικτύου, το ARPANET (Chong & Kumar, 2003).

Η Αμερικάνικη DARPA, ανέπτυξε το σύστημα DSN (Distributed Sensor Network). Το σύστημα χρησιμοποιούσε αισθητήρες χαμηλού κόστους, κατανεμημένους στο χώρο, που επικοινωνούσαν μεταξύ τους, αλλά λειτουργούσαν ανεξάρτητα. Το πλάνο ήταν πολύ φιλόδοξο για την εποχή, δεδομένου ότι δεν υπήρχαν ακόμα προσωπικοί υπολογιστές (με την έννοια που χρησιμοποιούνται σήμερα), η επεξεργασία πραγματοποιούνταν σε μεγάλες υπολογιστικές μονάδες. Ακόμα και η ενσύρματη, τοπική δικτύωση υπολογιστών, το Ethernet, μόλις έκανε τα πρώτα του βήματα (Wang & Balasingham, 2010).

Πρωτοπόροι στην ανάπτυξη των DSN, στην ακαδημαϊκή κοινότητα, που ήταν και η απαρχή για επιστημονική έρευνα εκτός στρατιωτικών φορέων, ήταν τα Πανεπιστήμια Carnegie Mellon (CMU) και Massachusetts Institute of Technology (MIT). Ερευνητές του πρώτου ανέπτυξαν και παρουσίασαν το 1981 ένα λογισμικό, με το όνομα Accent, για επικοινωνία μεταξύ κατανεμημένων κόμβων. Το 1984 αναπτύχθηκε στο MIT μια εφαρμογή για εντοπισμό ελικοπτέρων χρησιμοποιώντας ένα πλήθος μικροφώνων, κατάλληλα τοποθετημένων στο χώρο. Παρόλ' αυτά η υπάρχουσα τεχνολογία δεν επέτρεπε την ευρεία εξάπλωσή τους, ενώ οι διαστάσεις των αισθητήρων,

περιορίζαν σε μεγάλο βαθμό τα πιθανά πεδία εφαρμογής τους. Επιπλέον τα πρώτα DSN, δεν σχετίζονταν άμεσα με την ασύρματη τεχνολογία.

Τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα της DARPA, άρχισαν να κεντρίζουν το ενδιαφέρον και άλλων σχεδιαστών στρατιωτικών εφαρμογών. Στρατιωτικοί φορείς επένδυσαν στην τεχνολογία των δικτύων αισθητήρων, ξοδεύοντας μεγάλα χρηματικά ποσά. Έτσι η τεχνολογία εξελίχθηκε με ακόμα ταχύτερους ρυθμούς στις αρχές της δεκαετίας του 1990.

Οι κυβερνήσεις και τα πανεπιστήμια τελικά άρχισαν να χρησιμοποιούν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων σε εφαρμογές όπως η παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα, η ανίχνευση των δασικών πυρκαγιών, η πρόληψη φυσικών καταστροφών και η παρακολούθηση κατασκευών (monitoring). Στη συνέχεια, όταν οι φοιτητές – ερευνητές απορροφήθηκαν από τεχνολογικούς κολοσσούς, όπως η IBM και η Bell Labs, η τεχνολογία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, άρχισε να προωθείται και σε εφαρμογές της βαριάς βιομηχανίας, όπως η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας, η επεξεργασία λυμάτων και ο αυτοματισμός παραγωγής σε μεγάλα εργοστάσια.

Η ραγδαία εξέλιξη στην πληροφορική, τις τηλεπικοινωνίες και την τεχνολογία των MEMS έχουν επιφέρει σημαντικές αλλαγές στον τομέα της έρευνας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Το νέο κύμα της έρευνας στα WSNs άρχισε περίπου το 2000 και έχει προσελκύει όλο και περισσότερο τη διεθνή επιστημονική κοινότητα.

Η έρευνα εστιάζει μεταξύ άλλων, σε τεχνικές δικτύωσης, στην επεξεργασία της πληροφορίας σε δυναμικά περιβάλλοντα, δικτυακές τεχνικές και σε δίκτυα αισθητήρων με περιορισμένους πόρους ενέργειας. Επιπλέον ο συνδυασμός του ολοένα και μικρότερου κόστους και ολοένα και μικρότερου μεγέθους, έχει ως αποτέλεσμα τη χρήση τους σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Χώρες όπως η Κίνα έχουν ενσωματώσει τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων στα εθνικά ερευνητικά προγράμματα τους. (Silicon Labs, 2013)

Το 2003 δημοσιεύθηκε το πρότυπο ZigBee. Προτάθηκε από ένα πλήθος σημαντικών εταιριών (ZigBee Alliance) και καθορίζει ένα σύνολο πρωτοκόλλων επικοινωνίας, υψηλού επιπέδου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Το πρότυπο αναθεωρήθηκε μόλις το 2006. (<http://www.zigbee.org/>, 2015)

Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που απαιτείται χαμηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, μπαταρία μακράς διάρκειας και ασφαλής δικτύωση. Έχει καθορισμένο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και ταιριάζει καλύτερα σε περιοδικές, διακεκομμένες ή μοναδικές εκπομπές σήματος από τον

αισθητήρα. Η τεχνολογία του ZigBee είναι απλούστερη και φθηνότερη από αυτές άλλων δικτύων WPANs, όπως του Bluetooth. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι εφαρμογές smart home οι οποίες δημιουργούν οικιακά δίκτυα αισθητήρων ή/και ελέγχου συσκευών με χρήση του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου.

Επί του παρόντος, τα WSN θεωρούνται ως μία από τις σημαντικότερες τεχνολογίες για τον 21ο αιώνα και όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.1, επηρεάζουν πλέον όλο και περισσότερο την καθημερινότητά μας.



Εικόνα 1.1: Σήμερα τα GSN βρίσκονται παντού

1.3 Τρόπος λειτουργίας

Ένα ολοκληρωμένο ασύρματο δίκτυο γεωαισθητήρων, αποτελείται από ένα σύνολο υλικών (hardware) και δικτυακών υποδομών, λογισμικού και υπηρεσιών (software). Η αρχή λειτουργίας ενός WSN βασίζεται στη μέτρηση ενός φυσικού φαινομένου και την αποστολή των μετρήσεων μέσω ασύρματης επικοινωνίας.

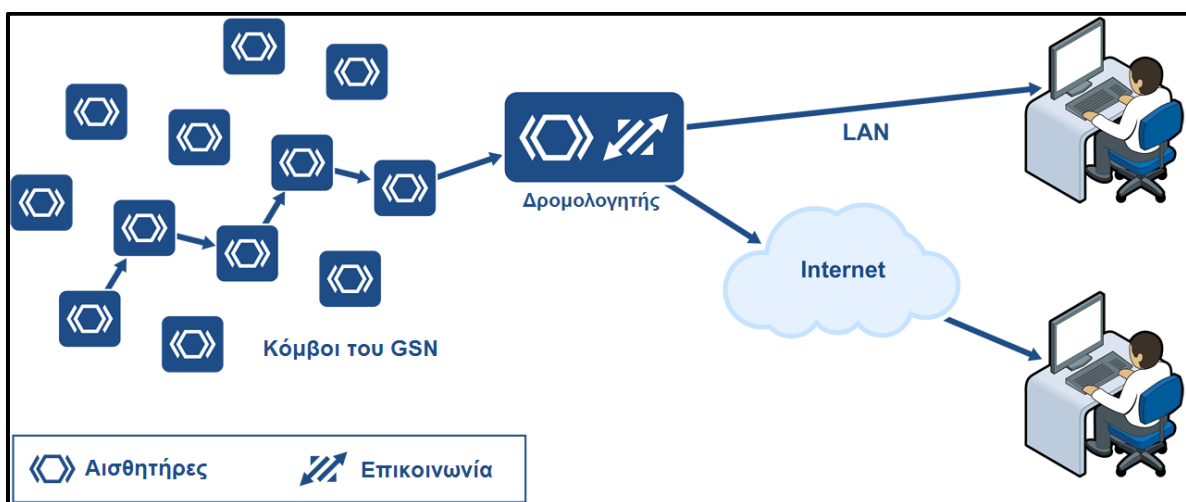
Ένας μεγάλος αριθμός γεωαισθητήρων, οι κόμβοι του δικτύου, βρίσκονται χωρικά κατανομημένοι στην περιοχή μελέτης. Οι γεωαισθητήρες μπορεί να έχουν τοποθετηθεί σε προαποφασισμένες ή σε τυχαίες θέσεις, να έχουν ριφθεί από αέρος ή να είναι κινητοί. Κάθε ένας από αυτούς έχει δυνατότητα παρακολούθησης, μέτρησης ή ανίχνευσης τουλάχιστον ενός φυσικού μεγέθους ή φαινομένου, είτε συνεχώς, είτε σε συγκεκριμένες (προκαθορισμένες ή μη) χρονικές στιγμές.

Τα δεδομένα της λειτουργίας κάθε γεωαισθητήρα, αποστέλλονται σε έναν ή περισσότερους δρομολογητές (Gateway). Είναι δυνατόν πριν την αποστολή τους, να έχουν υποστεί επεξεργασία. Επίσης η αποστολή των δεδομένων μπορεί να γίνει είτε απευθείας προς το δρομολογητή, είτε μέσω άλλων κόμβων του δικτύου.

Στη συνέχεια, τα δεδομένα αποστέλλονται μέσω του δρομολογητή σε ένα κεντρικό σταθμό ελέγχου. Η αποστολή μπορεί να γίνει είτε μέσω διαδικτύου, είτε κάνοντας χρήση τοπικού δικτύου. Στην κεντρική μονάδα τα δεδομένα επεξεργάζονται, αναλύονται και αποθηκεύονται. Ανάλογα με τη φύση της εφαρμογής η επεξεργασία και η ανάλυση των δεδομένων μπορεί να γίνει σε πραγματικό χρόνο ή εκ των υστέρων. Επίσης είναι δυνατό να υπάρχουν συστήματα υποστήριξης αποφάσεων, ώστε ανάλογα με τα δεδομένα, να προτείνονται λύσεις (σχήμα 1.1).

Στο εν λόγω σχήμα, απεικονίζεται μια απλή περίπτωση μεταφοράς δεδομένων, όπου κάθε κόμβος του δικτύου, αποστέλλει τα δεδομένα στον επόμενο, μέχρις ότου ο τελευταίος τα αποστείλει στον δρομολογητή. Όπως αναλύεται παρακάτω υπάρχουν διαφορετικές μορφές στον τρόπο αποστολής των δεδομένων (τοπολογία), όπως η τοπολογία αστέρα, δέντρου κ.α., ή ακόμα και συνδυασμοί αυτών.

Τέλος είναι δυνατή η αποστολή των δεδομένων σε οποιαδήποτε συσκευή το υποστηρίζει, όπως έξυπνα τηλέφωνα (smart phones), laptops, PDAs, ή ακόμα και να παρέχονται ελεύθερα στους χρήστες μέσω διαδικτύου.



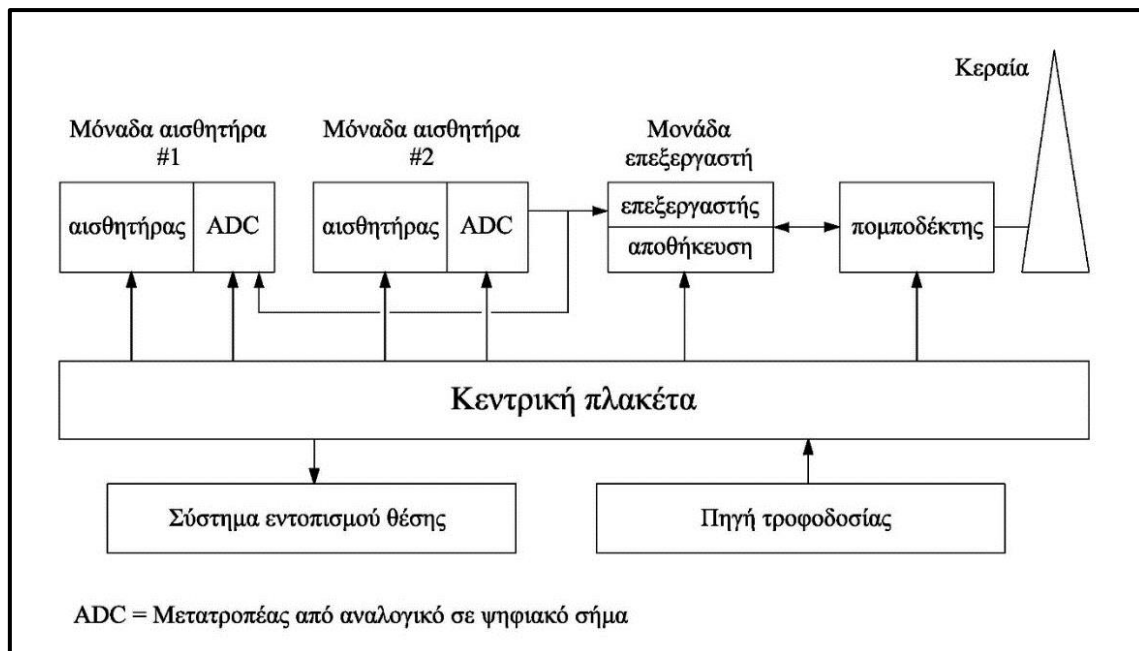
Σχήμα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας ενός GSN

1.4 Τυπικά μέρη ενός γεωαισθητήρα

Ένα δίκτυο γεωαισθητήρων αποτελείται από κόμβους (γεωαισθητήρες) κατανομημένους στο χώρο. Σε ένα GSN, κάθε κόμβος εκτελεί αυτόνομα ορισμένες λειτουργίες ανίχνευσης και επεξεργασίας. Επιπλέον, οι κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους, προκειμένου να αποστείλουν τις πληροφορίες τους σε μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας. Τα τυπικά μέρη ενός γεωαισθητήρα περιλαμβάνουν (σχήμα 1.2):

- έναν ενσωματωμένο επεξεργαστή
- εσωτερική και εξωτερική μνήμη
- έναν πομποδέκτη
- μια πηγή τροφοδοσίας και
- έναν ή περισσότερους αισθητήρες.
- Επιπλέον μπορεί να περιλαμβάνει και ένα δέκτη GPS. (Wang & Balasingham, 2010), (Nack, 2009).

Η ανάγκη για ενσωμάτωση δεκτών GPS έχει ουσιαστικά νόημα, στην περίπτωση που ο αισθητήρας μετακινείται και είναι απαραίτητη η καταγραφή της θέσης ταυτόχρονα με την τιμή του παρατηρούμενου φαινομένου, ή ήταν το παρατηρούμενο μέγεθος είναι η ίδια η θέση (π.χ. περιπτώσεις μικρομετακινήσεων ή παραμορφώσεων).



Σχήμα 1.2: Τυπικά μέρη ενός γεωαισθητήρα

1.4.1 Επεξεργαστής

Σε έναν γεωαισθητήρα, οι υπολογιστικές εργασίες αφορούν τόσο στην επεξεργασία του μετρούμενου μεγέθους, από τον ίδιο το γεωαισθητήρα, όσο και στην επεξεργασία της πληροφορίας που αποστέλλονται από τους άλλους κόμβους του δικτύου. Επίσης πρέπει να ελέγχει και να συντονίζει τη λειτουργία των υπολοίπων τμημάτων του γεωαισθητήρα. Προς το παρόν, κυρίως για οικονομικούς λόγους, αλλά και για λόγους ενεργειακής επάρκειας, οι ενσωματωμένοι επεξεργαστές είναι μικρής υπολογιστικής ισχύος.

Λόγω του συγκεκριμένου περιορισμού των επεξεργαστών, οι γεωαισθητήρες λειτουργούν συνήθως με εξειδικευμένα λειτουργικά συστήματα, όπως το TinyOS. (<http://webs.cs.berkeley.edu/tos/>, 2016)

Επίσης ενσωματώνουν προηγμένες τεχνικές χαμηλής ενέργειας, όπως η λειτουργία ύπνου (sleep mode) και η Δυναμική Κλιμάκωση Τάσης (DVS) με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας.

Οι τύποι επεξεργαστών που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι μικροελεγκτές, DSP, FPGA και ASIC. Από αυτούς, οι μικροελεγκτές είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενοι, κυρίως λόγω της τιμής τους, αλλά και της ευελιξίας τους να συνδέονται και με άλλες συσκευές.

1.4.2 Μνήμες

Η μνήμη σε έναν γεωαισθητήρα, συμπεριλαμβάνει τη μνήμη RAM του μικροελεγκτή και πιθανώς τη δυνατότητα επέκτασης με εξωτερική κάρτα. Αποθηκεύονται πληροφορίες που αφορούν τη λειτουργία του επεξεργαστή, αλλά και στην αποθήκευση των μετρούμενων μεγεθών και άλλων παραμέτρων (π.χ. πληροφορίες που αφορούν στη θέση του γεωαισθητήρα). Προς το παρόν, όπως και στους επεξεργαστές, έτσι και στη μνήμη η χωρητικότητα είναι περιορισμένη για οικονομικούς λόγους. Παρόλ' αυτά με τη συνεχή μείωση των τιμών των συσκευών μνήμης, η χωρητικότητα τόσο της εξωτερικής μνήμης, όσο και της μνήμης RAM, αυξάνεται συνεχώς με την πάροδο του χρόνου.

1.4.3 Πομποδέκτης

Οι γεωαισθητήρες περιλαμβάνουν δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας, συνήθως με χαμηλό ρυθμό αποστολής και περιορισμένης εμβέλειας (πχ 10-100 kbps, <100 m). Ο πομποδέκτης είναι υπεύθυνος για την ασύρματη επικοινωνία

του κόμβου με τους υπόλοιπους. Η επικοινωνία με ραδιοσυχνότητες (RF), είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη σε εφαρμογές δικτύων γεωαισθητήρων.

Η ραδιοεπικοινωνία είναι συνήθως η περισσότερο απαιτητική σε ενέργεια λειτουργία ενός γεωαισθητήρα, και ως εκ τούτου, ο πομποδέκτης πρέπει να ενσωματώσει ενεργειακά αποδοτικές λειτουργίες μετάδοσης, λήψης, αδρανοποίησης και αφύπνισης. Παρότι μέχρι στιγμής οι πομποδέκτες έχουν περιορισμένες δυνατότητες είναι πιθανό η λειτουργικότητά τους σταδιακά να βελτιωθεί. Οι βελτιώσεις αφορούν κυρίως στο κόστος, τη φασματική αποτελεσματικότητα, την ικανότητα συντονισμού αλλά και την «ανοσία» στο θόρυβο, την εξασθένιση σήματος και τις παρεμβολές.

1.4.4 Πηγή τροφοδοσίας

Αποτελεί ιδιαίτερα κρίσιμο παράγοντα, ειδικά σε εφαρμογές ευρείας κλίμακας, όπου είναι δύσκολη ή αδύνατη η παρακολούθηση και αντικατάσταση της τροφοδοσίας των αισθητήρων. Σε ένα γεωαισθητήρα, η ενέργεια καταναλώνεται κυρίως κατά την επικοινωνία και αποστολή δεδομένων, αλλά και κατά την ανίχνευση/μέτρηση του μεγέθους και επεξεργασία των δεδομένων.

Η κυριότερη πηγή τροφοδοσίας είναι οι μπαταρίες. Με δεδομένο την περιορισμένη χωρητικότητα των μπαταριών (συνεπώς και τον περιορισμένο χρόνο ζωής τους), η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας του κάθε κόμβου αποτελεί καθοριστικό σημείο κατά το σχεδιασμό και οργάνωση ενός GSN.

Προκειμένου να αρθεί ο περιορισμός της ενέργειας, πραγματοποιείται έρευνα σχετικά με τεχνικές συλλογής ενέργειας (energy-harvesting techniques) σε GSN. Οι τεχνικές αυτές επιτρέπουν τη μετατροπή ενέργειας του περιβάλλοντος (π.χ. ηλιακή, αιολική, θερμική) σε ηλεκτρική ενέργεια, ώστε να συνεισφέρουν στην τροφοδοσία του γεωαισθητήρα. Οι τεχνικές αυτές βέβαια θέλουν ιδιαίτερη προσοχή κατά το σχεδιασμό του δικτύου, ώστε να φανεί ποια είναι η πλέον κατάλληλη μορφή ενέργειας στην περιοχή μελέτης. Ένας διαφορετικός τρόπος τροφοδοσίας είναι η τροφοδοσία από χημική αντίδραση που μπορεί να προκληθεί με την υψηλή θερμοκρασία ή ακόμη και την καύση του αισθητήρα.

Επίσης υπάρχουν αισθητήρες με συχνά διαστήματα “sleep mode”, και των οποίων οι ενεργειακές ανάγκες είναι περιορισμένες. Στην ιδανική περίπτωση

και αν η εφαρμογή το επιτρέπει, περιορίζονται στην εκπομπή του σήματος μόνο κατά τη φάση συναγερμού.

1.4.5 Αισθητήρες

Ο αισθητήρας είναι μια συσκευή που λαμβάνει ένα ερέθισμα του εξωτερικού περιβάλλοντος σε αναλογική μορφή (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία, πίεση) και το μετατρέπει σε ψηφιακό σήμα. Το αναλογικό σήμα, το οποίο είναι συνεχές, ψηφιοποιείται από ένα μετατροπέα ADC (analog-to-digital converter) και αποστέλλεται στον ενσωματωμένο επεξεργαστή για περαιτέρω επεξεργασία. Επειδή ο γεωαισθητήρας είναι μια μικρο-ηλεκτρονική συσκευή, η οποία τροφοδοτείται από μια πηγή περιορισμένης ισχύος, τα αισθητήρια όργανα πρέπει επίσης να είναι μικρά σε μέγεθος και να καταναλώνουν εξαιρετικά χαμηλή ποσότητα ενέργειας.

Σε πολλές εφαρμογές απαιτείται η παρατήρηση και καταγραφή περισσότερων του ενός μεγέθους, με αποτέλεσμα σε κάθε κόμβο να πρέπει να εφαρμοσθούν περισσότεροι του ενός αισθητήρες. Το ποιοι συγκεκριμένοι αισθητήρες θα χρησιμοποιηθούν, προφανώς εξαρτάται από την εφαρμογή.

1.4.6 Σύστημα εντοπισμού

Απαραίτητη προϋπόθεση για ένα δίκτυο γεωαισθητήρων είναι η δυνατότητα προσδιορισμού θέσης του αισθητήρα. Υπάρχουν εφαρμογές στις οποίες είναι εκ των προτέρων γνωστή η θέση τοποθέτησης του αισθητήρα. Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως, αυτό δεν είναι εφικτό. Ιδιαίτερα για πολλές εφαρμογές ευρείας κλίμακας, όπου οι αισθητήρες τοποθετούνται τυχαία, προκειμένου να είναι δυνατός ο εντοπισμός τους, ενσωματώνεται σε αυτούς ένας δέκτης GPS. Όπως αντιλαμβάνεται κανείς, κάτι τέτοιο αυξάνει σημαντικά το κόστος του αισθητήρα και την κατανάλωση ενέργειας και συνεπώς και ολόκληρου του δικτύου.

Έτσι, όπως τονίστηκε και προηγουμένως, η ανάγκη για δέκτη GPS έχει νόημα, στην περίπτωση που ο αισθητήρας μετακινείται ή είναι άγνωστη η θέση τοποθέτησής του ή ήταν το παρατηρούμενο μέγεθος είναι η ίδια η θέση (π.χ. περιπτώσεις μικρομετακινήσεων ή παραμορφώσεων).

1.5 Στατικά χαρακτηριστικά ενός γεωαισθητήρα

Σε όλα τα συστήματα μέτρησης, η τιμή του μετρούμενου μεγέθους, έχει μικρή αξία, αν δεν είναι γνωστή η ποιότητα της μέτρησης. Στατικά χαρακτηριστικά των γεωαισθητήρων ονομάζονται κάποιες παράμετροι που τους χαρακτηρίζουν. Τα χαρακτηριστικά αυτά επιτρέπουν, αρχικά την επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα για τη συγκεκριμένη εφαρμογή μέτρησης και στη συνέχεια την αξιολόγηση του παρατηρούμενου μεγέθους. (Αργυρίου, 2004), (Βερυκοκίδης, 2010)

Ακρίβεια μέτρησης (precision): Αποτυπώνει τη λεπτομέρεια με την οποία λαμβάνονται οι ενδείξεις ή αλλιώς το πόσο κοντά είναι μεταξύ τους κάποιες ανεξάρτητες παρατηρήσεις του ίδιου συγκεκριμένου μεγέθους. Αν ληφθεί ένας μεγάλος αριθμός παρατηρήσεων, σε κάποιο αμετάβλητο μέγεθος, από τον ίδιο αισθητήρα, θα πρέπει οι παρατηρήσεις αυτές να έχουν μικρή διασπορά (εσωτερική ακρίβεια). Έχει άμεση σχέση με την ποιότητα του χρησιμοποιούμενου οργάνου και μπορεί να εκτιμηθεί από μια σειρά παρατηρήσεων.

Ορθότητα – Ποιότητα μέτρησης (accuracy): Σε ανεξάρτητες, επαναλαμβανόμενες μετρήσεις ενός μεγέθους, που γίνονται υπό τις ίδιες συνθήκες, εκφράζει το βαθμό ταύτισης της μετρημένης τιμής με την αντίστοιχη αληθή τιμή (εξωτερική ακρίβεια). Δε μπορεί να εκτιμηθεί από μια σειρά μετρήσεων με τον ίδιο αισθητήρα. Συχνά συγχέεται με την ακρίβεια της μέτρησης. Η μεγάλη ακρίβεια δεν σημαίνει κατ' ανάγκην ορθότητα και καλή ποιότητα μέτρησης. Ένας ακριβής αισθητήρας μπορεί να έχει κακή ορθότητα. Κακής ορθότητας μετρήσεις από έναν ακριβή αισθητήρα, σημαίνει ότι η μετρήσεις έχουν συστηματικό σφάλμα, γεγονός το οποίο μπορεί να διορθωθεί με βαθμονόμηση (διακρίβωση) του αισθητήρα.

Εύρος λειτουργίας: είναι τα όρια μέσα στα οποία μπορεί να λειτουργήσει αξιόπιστα η συσκευή. Συνήθως εκφράζεται με τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή του μεγέθους, που μπορεί να μετρήσει.

Διακριτική ικανότητα (resolution): αναφέρεται στην ελάχιστη μεταβολή του σήματος εισόδου, ώστε να προκληθεί μεταβολή στο σήμα εξόδου του αισθητήρα. Εκφράζεται συνήθως ως προς το μικρότερο διάστημα που μπορεί να ανιχνευθεί ή μετρηθεί. Όσο καλύτερη είναι η διακριτική ικανότητα ενός αισθητήρα, τόσο μικρότερη είναι η τιμή που μπορεί να μετρήσει.

Καθυστέρηση (lag): είναι η καθυστέρηση της αλλαγής της τιμής εξόδου ενός αισθητήρα ως προς την αλλαγή της εισόδου του. Μετριέται σε κλάσματα

του δευτερολέπτου. Σε μερικές εφαρμογές, η καθυστέρηση μπορεί να επηρεάζει αποφασιστικά την απόδοση.

Αβεβαιότητα (uncertainty): αποτελεί την ποσοτική μέτρηση της ποιότητας του αποτελέσματος μετρήσεων. Σε κάθε περίπτωση, μέτρηση χωρίς την αντίστοιχη αβεβαιότητα μέτρησης, δεν έχει καμία αξία.

Γραμμικότητα (linearity): αποτελεί το βαθμό στον οποίο η γραφική παράσταση της εξόδου ως προς την είσοδο του αισθητήρα προσεγγίζει μία ευθεία γραμμή (π.χ. την θεωρητική συμπεριφορά της μεταβολής). Ένας αισθητήρας μπορεί να είναι γραμμικός σε μία περιοχή τιμών εισόδου. Επίσης, η γραμμικότητα μπορεί να εκφράζεται ως προς το μέγιστο βαθμό απόκλισης από την ευθεία γραμμή σε όλο το εύρος τιμών εισόδου και τότε αναφέρεται ως ποσοστό επί του εύρους λειτουργίας

Ευαισθησία στη μέτρηση: Είναι ο λόγος της μεταβολής στην ένδειξη του αισθητήρα, κατά τη μέτρηση, προς τη μεταβολή του μεγέθους που την προκάλεσε.

Ευαισθησία στη διαταραχή: Η βαθμονόμηση και τα χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα, ισχύουν όταν αυτός λειτουργεί εντός συγκεκριμένου εύρους περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η σχετική υγρασία κ.α. Το εύρος καθορίζεται από τον κατασκευαστή. Η μεταβολή κάποιων εξ αυτών των συνθηκών, ενδέχεται να μεταβάλει κάποιο από τα χαρακτηριστικά του.

1.6 Παράμετροι αξιολόγησης γεωαισθητήρων

Η φύση του προβλήματος είναι αυτή που καθορίζει τις παραμέτρους οι οποίες θα αξιολογηθούν κατά την επιλογή των γεωαισθητήρων. Κάθε μεμονωμένος κόμβος πρέπει να αξιολογηθεί για μια πληθώρα παραμέτρων, ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθεί.

Η σωστή αξιολόγηση του κάθε ενός γεωαισθητήρα ως μονάδα, θα έχει αντίκτυπο και στην αξιολόγηση κατά το σχεδιασμό ολόκληρου του δικτύου. Επίσης, οι διαφορετικές παράμετροι, είναι συχνά αλληλένδετες μεταξύ τους. Έτσι η βελτίωση μιας παραμέτρου (π.χ. βεληνεκές αποστολής δεδομένων), μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την επιδείνωση μιας άλλης (π.χ. κατανάλωση ενέργειας).

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή εξετάζεται το πρόβλημα της χωροθέτησης ενός δικτύου αισθητήρων ως προς τη χωρική κάλυψη της

περιοχής μελέτης. Παρόλ' αυτά, κρίνεται σκόπιμο για λόγους πληρότητας να αναφερθούν οι παράμετροι αξιολόγησης ενός δικτύου, παρόλο που στην πλειοψηφία τους αφορούν κυρίως στην δικτυακή κάλυψη της περιοχής.

1.6.1 Κατανάλωση ενέργειας

Όπως προαναφέρθηκε, οι γεωαισθητήρες, ειδικά σε εφαρμογές ευρείας κλίμακας, τροφοδοτούνται συνήθως από ηλεκτροσυσσωρευτές (μπαταρίες). Αυτό περιορίζει σε μεγάλο βαθμό τη διάρκεια ζωής των αισθητήρων. Προκειμένου να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις εφαρμογών μεγάλης χρονικής διάρκειας, πρέπει να είναι εξαιρετικά χαμηλής ισχύος. Η μέση κατανάλωση ενός αισθητήρα μετράται σε μικροαμπερώρια (μAh). Αυτή η εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση επιτυγχάνεται συνδυάζοντας χαμηλή κατανάλωση τόσο στα μέρη του αισθητήρα, όσο και στις λειτουργίες του.

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του κόμβου, η αποστολή δεδομένων μέσω ραδιοεπικοινωνίας, αποτελεί ένα σημαντικό μέρος της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας.

Έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι και πρωτόκολλα προκειμένου να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας, μέσω έξυπνων λειτουργιών, όποτε είναι δυνατόν. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την επεξεργασία της πληροφορίας τοπικά, στον κόμβο, ώστε να μειωθεί ο όγκος της μεταδιδόμενης πληροφορίας ή πληροφορίες από γειτονικούς κόμβους να συνδυαστούν μεταξύ τους πριν από την αποστολή τους στο κέντρο ελέγχου. Τέλος, η κατανάλωση ελαχιστοποιείται χρησιμοποιώντας αισθητήρες με συχνά διαστήματα "sleep mode" και ιδανικά ενεργοποιούνται μόνο για την εκπομπή σήματος.

1.6.2 Μέγεθος & κόστος

Οι διαστάσεις και το κόστος κάθε γεωαισθητήρα έχει σημαντικό και άμεσο αντίκτυπο στην ευκολία και το κόστος της εγκατάστασης του. Το συνολικό κόστος αγοράς και εγκατάστασης κάθε κόμβου, είναι βασικός παράγοντας που καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το σχεδιασμό του συνολικού δικτύου.

Συχνά στα δίκτυα γεωαισθητήρων το ζητούμενο είναι η συλλογή δεδομένων από όσο το δυνατόν περισσότερες τοποθεσίες χωρίς το κόστος να υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο προϋπολογισμό. Η μείωση του κόστους ανά κόμβο, έχει ως αποτέλεσμα την αγορά περισσότερων κόμβων και σχεδίαση

δικτύου με μεγαλύτερη πυκνότητα, ώστε να συλλέγονται περισσότερα δεδομένα.

Αντίστοιχα οι διαστάσεις κάθε κόμβου, έχουν αντίκτυπο στην ευκολία εγκατάστασης του δικτύου. Γεωαισθητήρες με μικρές διαστάσεις μπορούν να τοποθετηθούν ευκολότερα, σε περισσότερες θέσεις και να χρησιμοποιηθούν σε περισσότερες εφαρμογές.

Σε κάθε περίπτωση και σε συνδυασμό με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι συγκεκριμένες παράμετροι και να βρίσκεται η χρυσή τομή μεταξύ του κόστους (άρα και της ποιότητας του αισθητήρα) και του χρόνου ζωής αυτού.

1.6.3 Ευελιξία χρήσης

Το ευρύ φάσμα εφαρμογών στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας κόμβος, σημαίνει ότι η κατασκευή του, πρέπει να είναι ευέλικτη και ευπροσάρμοστη. Κάθε εφαρμογή ενδεχομένως να απαιτεί και διαφορετικούς συνδυασμούς διάρκειας ζωής, ρυθμού συλλογής δεδομένων, χρόνου απόκρισης και επεξεργασίας. Η αρχιτεκτονική ενός WSN πρέπει να είναι αρκετά ευέλικτη, ώστε να επιτρέπει τη χρήση της σε ένα μεγάλο συνδυασμό παραμέτρων. Παρόλ' αυτά, για λόγους οικονομίας, κάθε γεωαισθητήρας, ενσωματώνει μόνο το λογισμικό (software) και τα μέρη (hardware), που απαιτούνται για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Η αρχιτεκτονική πρέπει να διευκολύνει το σωστό συνδυασμό λογισμικού και υλικών μερών.

Έτσι λοιπόν κάθε γεωαισθητήρας πρέπει να δίνει στο χρήστη μεγάλες δυνατότητες παραμετροποίησης και ευελιξίας στη χρήση του, τόσο στο λογισμικό του, όσο και στα υλικά μέρη του, και ταυτόχρονα να διατηρεί την αποτελεσματικότητά του.

1.6.4 Ασφάλεια

Μια σημαντική παράμετρος που τίθεται σε κάθε σύστημα συλλογής δεδομένων, είναι η παρεχόμενη ασφάλειά τους, η οποία ασφαλώς εξαρτάται από την εφαρμογή. Προκειμένου κάθε εφαρμογή να μπορεί να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις ασφάλειας, οι επιμέρους γεωαισθητήρες πρέπει να ενσωματώνουν αλγόριθμους πιστοποίησης και κρυπτογράφησης.

Η αποστολή δεδομένων, μέσω ασύρματης επικοινωνίας είναι επιρρεπής σε υποκλοπές. Εφόσον η εφαρμογή το απαιτεί, και προκειμένου να διατηρηθούν

ασφαλείς οι πληροφορίες που αποστέλλονται μέσω ενός ασύρματου δικτύου, θα πρέπει να κρυπτογραφηθεί, κάθε αποστολή δεδομένων. Ο επεξεργαστής κάθε γεωαισθητήρα, θα πρέπει να μπορεί να εκτελεί όλες τις απαιτούμενες λειτουργίες κρυπτογράφησης, είτε αυτόνομα, είτε μέσω κάποιου ενσωματωμένου κρυπτογραφικού επιταχυντή.

Επιπλέον, εκτός από την ασφαλή μετάδοση των δεδομένων, κάθε κόμβος θα πρέπει να διατηρεί και την ασφάλεια των στοιχείων που έχει αποθηκευμένα. Όπως έχει αναφερθεί, οι γεωαισθητήρες έχουν περιορισμένες δυνατότητες αποθήκευσης δεδομένων, αλλά σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να κρατούν αποθηκευμένα τα κλειδιά κρυπτογράφησης που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο, τα οποία αν διαρρεύσουν μπορούν να οδηγήσουν σε κατάρρευση του δικτύου. Έτσι για να παρέχεται ασφάλεια στα δεδομένα, πρέπει να είναι δύσκολη η δυνατότητα απόσπασης των κλειδιών κρυπτογράφησης από οποιοδήποτε κόμβο.

1.6.5 Επικοινωνία

Βασική παράμετρος αξιολόγησης σε κάθε ασύρματο δίκτυο γεωαισθητήρων, αποτελούν τα χαρακτηριστικά που συνθέτουν την επικοινωνία κάθε κόμβου με τους υπόλοιπους το ρυθμό επικοινωνίας, την κατανάλωση ενέργειας κατά την αποστολή δεδομένων και την εμβέλεια αποστολής δεδομένων.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η εμβέλεια συλλογής και αποστολής δεδομένων, έχει άμεσο αντίκτυπο στον ελάχιστο αριθμό αισθητήρων για την πλήρη κάλυψη της περιοχής. Αν οι αισθητήρες τοποθετηθούν σε μακρινές αποστάσεις ο ένας από τον άλλον, ενδέχεται να μην καλύπτεται πλήρως η περιοχή μελέτης, να μην καθίσταται δυνατή η αποστολή των δεδομένων από αυτούς ή να μην παρέχουν ικανοποιητικό βαθμό εφεδρείας στο δίκτυο.

Η κάθε εφαρμογή απαιτεί διαφορετική πυκνότητα κόμβων για τη συλλογή των δεδομένων. Αντίστοιχα μπορεί να υπάρχουν και διαφορετικές απαιτήσεις στην εμβέλεια μετάδοσης των δεδομένων. Ανάλογα με τις απαιτήσεις αυτές μπορεί να απαιτείται πύκνωση του δικτύου ώστε να καλύπτεται ικανοποιητικά η περιοχή.

Η ταχύτητα αποστολής των δεδομένων, ανάλογα με την εφαρμογή, καθορίζει αποφασιστικά την επιλογή του γεωαισθητήρα. Μεγαλύτερες ταχύτητες αποστολής, δίνουν και τη δυνατότητα για συχνότερη συλλογή δεδομένων από το περιβάλλον, αλλά και χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.

Όσο αυξάνεται ο ρυθμός αποστολής, η μετάδοση των δεδομένων γίνεται σε συντομότερο χρόνο, και έτσι καταναλώνεται λιγότερη ενέργεια. Από την άλλη όμως, απαιτείται μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύς, γεγονός που επιδρά στην κατανάλωση. Συνολικά, τα οφέλη από την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης, μπορούν να αντισταθμιστούν, από άλλους παράγοντες.

1.6.6 Υπολογιστική ισχύς

Οι πλέον απαιτητικές σε υπολογιστική ισχύ λειτουργίες για έναν αισθητήρα, είναι η επεξεργασία των δεδομένων και η διαχείριση των πρωτοκόλλων επικοινωνίας και μάλιστα σε πραγματικό χρόνο. Όταν τα δεδομένα φθάσουν από το δίκτυο σε έναν κόμβο, ο επεξεργαστής, πρέπει ταυτόχρονα να διαχειριστεί την επικοινωνία, αλλά και την αποκωδικοποίηση και καταγραφή των δεδομένων. Προφανώς υψηλότερος ρυθμός αποστολής δεδομένων, απαιτεί και μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ.

Επιπλέον πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι διεργασίες κατά τη συλλογή των δεδομένων. Οι αναλογικοί αισθητήρες μπορούν να δέχονται συνεχή ροή δεδομένων.

Μερικές τυπικές διαδικασίες σε έναν κόμβο, μπορεί να είναι ο υπολογισμός μέσων όρων, φιλτράρισμα τιμών ή εντοπισμός ακραίων τιμών για την ανίχνευση κάποιου γεγονότος. Επίσης ίσως κριθεί απαραίτητο να συνδυάζονται τα δεδομένα γειτονικών αισθητήρων πριν την αποστολή τους. Όλα τα παραπάνω αυξάνουν τις απαιτήσεις σε πόρους.

Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να διατηρείται μια ισορροπία μεταξύ υπολογιστικής ισχύος, ταχύτητας μετάδοσης, μεγέθους και κατανάλωσης ενέργειας, ώστε να επιτυγχάνεται το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα.

Το πρόβλημα της χωροθέτησης παραμένει κρίσιμο, και σε εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων, όπου ο αισθητήρας έχει σχεδόν μηδενική υπολογιστική ισχύ. Για παράδειγμα στις περιπτώσεις δικτύων ανίχνευσης πυρκαγιάς, ο αισθητήρας «ξυπνάει» από διακόπτη διμεταλλικού ελάσματος και εκπέμπει για δευτερόλεπτα, ώστε να σημάνει συναγερμός.

1.7 Είδη δικτύων γεωαισθητήρων

Ο χώρος στον οποίο αναπτύσσεται ένα ασύρματο δίκτυο γεωαισθητήρων ποικίλει ανάλογα με το είδος της εφαρμογής. Επίσης δημιουργούνται διαφορετικές προκλήσεις και περιορισμοί ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο εγκαθίσταται. Έτσι λοιπόν, ως προς το περιβάλλον το οποίο αναπτύσσονται υπάρχουν πέντε διαφορετικές κατηγορίες δικτύων. (Yick, Mukherjee, & Ghosal, 2008)

Επίγεια ασύρματα δίκτυα γεωαισθητήρων: Τυπικά αποτελούνται από εκατοντάδες έως χιλιάδες αισθητήριους κόμβους χαμηλού κόστους, εγκατεστημένους σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Το δίκτυο μπορεί να είναι είτε αυτο-οργανωμένο (ad hoc network), είτε προσχεδιασμένο. Στην περίπτωση των αυτο-οργανωμένων δικτύων οι αισθητήρες μπορούν να ριφθούν από ένα αεροπλάνο και να τοποθετηθούν τυχαία στην περιοχή μελέτης. Στην προσχεδιασμένη μορφή, η τοποθέτηση γίνεται είτε σε μορφή κανάβου, είτε με βέλτιστη τοποθέτηση, είτε μέσω μοντέλων τοποθέτησης σε δύο ή σε τρεις διαστάσεις. Σε ένα επίγειο GSN, η αξιόπιστη επικοινωνία και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας είναι ιδιαίτερα κρίσιμοι παράγοντες.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων δικτύων, είναι τα δίκτυα ανίχνευσης πυρκαγιών σε δάση. Οι αισθητήρες εγκαθίστανται σε τυχαίες ή προεπιλεγμένες θέσεις εντός του δάσους και ενεργοποιούνται όταν ανιχνεύσουν καπνό ή αύξηση της θερμοκρασίας.

Υπόγεια ασύρματα δίκτυα γεωαισθητήρων: Η εγκατάσταση των αισθητήρων είναι κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και παρατήρηση φαινομένων του υπεδάφους. Συγκριτικά με τα επίγεια GSNs είναι ακριβότερα σε ότι αφορά στον εξοπλισμό, στην εγκατάσταση, αλλά και στην συντήρηση του δικτύου. Οι υπόγειοι αισθητήρες είναι ακριβότεροι γιατί θα πρέπει να είναι ανθεκτικότεροι, αλλά και να εξασφαλίζουν την επικοινωνία μέσω συστατικών όπως χώμα, νερό, βράχια κ.α. Το υπόγειο περιβάλλον αποτελεί πρόκληση για την ασύρματη επικοινωνία καθώς παρατηρούνται υψηλές απώλειες και εξασθένιση σήματος. Ένα υπόγειο GSN απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό, ειδικά σε ότι αφορά στην κατανάλωση ενέργειας, ώστε να αυξηθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου. Στην κατηγορία των υπόγειων δικτύων εντάσσονται εφαρμογές που σχετίζονται με παρακολούθηση υπόγειων κατασκευών (π.χ. σήραγγες), παρακολούθηση αγροτικής παραγωγής καθώς και αμυντικές εφαρμογές.

Υποθαλάσσια ασύρματα δίκτυα γεωαισθητήρων: Αποτελούνται από έναν αριθμό αισθητήρων και υποβρύχιων οχημάτων τα οποία αναπτύσσονται

κάτω από την επιφάνεια του νερού. Σε αντίθεση με τα επίγεια δίκτυα, οι υποθαλάσσιοι αισθητήρες είναι πιο δαπανηροί, αλλά η πυκνότητα τους είναι μικρότερη. Τα υποθαλάσσια οχήματα χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ή τη συλλογή των δεδομένων από τους αισθητήρες. Η επικοινωνία στα υποθαλάσσια δίκτυα γίνεται αξιοποιώντας τα ηχητικά κύματα. Αυτού του είδους η επικοινωνία αποτελεί αντικείμενο έρευνας, εξαιτίας της εξασθένησης σήματος και της μεγάλης καθυστέρησης διάδοσης. Επιπλέον πρόβλημα είναι η αστοχία των αισθητήρων, καθώς αυτοί βρίσκονται σε εξαιρετικά αφιλόξενο περιβάλλον με ιδιαίτερες συνθήκες. Οι αισθητήρες έχουν περιορισμένη ισχύ μπαταρίας, η οποία είναι αδύνατο να επαναφορτισθεί ή να αντικατασταθεί. Έτσι η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας σε υποθαλάσσια GSNs, έγκειται στην ανάπτυξη αποδοτικών μεθόδων επικοινωνίας και δικτυακών τεχνικών.

Ασύρματα δίκτυα γεωαισθητήρων πολυμέσων: Χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και την καταγραφή γεγονότων, με τη μορφή πολυμέσων, όπως βίντεο, εικόνας και ήχου. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων πολυμέσων αποτελούνται από έναν αριθμό αισθητήρων χαμηλού κόστους εξοπλισμένων με κάμερες και μικρόφωνα. Οι αισθητήρες επικοινωνούν μεταξύ τους, μέσω ασύρματης επικοινωνίας, για την ανάκτηση δεδομένων, την επεξεργασία, τη συσχέτιση και τη συμπίεση αυτών. Εγκαθίστανται στο περιβάλλον σε προεπιλεγμένες θέσεις, ώστε να εξασφαλίζουν πλήρη κάλυψη της περιοχής μελέτης. Τα προβλήματα σε δίκτυα πολυμέσων είναι η ανάγκη για μεταφορά δεδομένων μεγάλου όγκου, η μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, οι τεχνικές συμπίεσης αλλά και η ποιότητα των υπηρεσιών (QoS). Η μετάδοση πολυμέσων, όπως το βίντεο, απαιτεί τη μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων, συχνά με μεγάλη ταχύτητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα και την υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Έτσι πρέπει να αναπτυχθούν τεχνικές με υψηλό ρυθμό μετάδοσης και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Τέλος, είναι σημαντικό να επιτυγχάνεται συγκεκριμένο επίπεδο ποιότητας (QoS) στην αποστολή της πληροφορίας. Η επεξεργασία των δεδομένων εντός του δικτύου, το φιλτράρισμα και η συμπίεση, μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τις επιδόσεις του δικτύου.

Κινητά ασύρματα δίκτυα γεωαισθητήρων: Αποτελούνται από ένα σύνολο αισθητήρων, οι οποίοι βρίσκονται σε κίνηση και αλληλεπιδρούν με το φυσικό περιβάλλον. Οι κινητοί αισθητήρες έχουν τη δυνατότητα συλλογής δεδομένων, επεξεργασίας και επικοινωνίας. Μια βασική διαφορά, σε σχέση με τα στατικά δίκτυα, είναι ότι οι κινητοί κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να αλλάζουν θέσεις και να οργανώνονται εκ νέου στο δίκτυο. Ένα κινητό GSN ξεκινάει με την αρχική εγκατάσταση των κόμβων, οι οποίοι στη συνέχεια εξαπλώνονται για να συλλέξουν δεδομένα. Οι πληροφορίες που συλλέγονται

από ένα κόμβο μπορούν να αποστέλλονται σε κάποιον άλλο, όταν βρίσκονται εντός συγκεκριμένης εμβέλειας.

Μια άλλη βασική διαφορά είναι δρομολόγηση των δεδομένων. Στα στατικά GSN, τα δεδομένα αποστέλλονται με σταθερή δρομολόγηση ή με δρομολόγηση flooding, σε αντίθεση με τα κινητά δίκτυα, όπου χρησιμοποιείται δυναμική δρομολόγηση. Προκλήσεις στα κινητά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούν η εγκατάσταση, ο εντοπισμός, η πλοήγηση, η αυτο-οργάνωση, η κάλυψη, η κατανάλωση ενέργειας, η συντήρηση και η επεξεργασία των δεδομένων. Οι εφαρμογές κινητών δικτύων περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, την παρακολούθηση του περιβάλλοντος, την ανίχνευση στόχων, τη διάσωση, την παρακολούθηση επικίνδυνων φαινομένων σε πραγματικό χρόνο. Συχνά είναι αδύνατη ή επικίνδυνη η εγκατάσταση δικτύου σε μια περιοχή. Οι κινητοί αισθητήρες μπορούν να προσεγγίσουν την περιοχή και να παρέχουν τις απαιτούμενες πληροφορίες και κάλυψη.

Στον πίνακα 1.1 φαίνονται συγκεντρωτικά τα είδη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων που αναλύθηκαν παραπάνω, τα πεδία έρευνας σε κάθε κατηγορία, καθώς και εφαρμογές στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί το κάθε είδος δικτύου.

	Επίγεια WSN	Υπόγεια WSN	Υποθαλάσσια WSN	WSN Πολυμέσων	Κινητά WSN
Ορισμός	Το δίκτυο αποτελείται από εκατοντάδες έως χιλιάδες αισθητήρες τοποθετημένους στη γη	Το δίκτυο αποτελείται από ασύρματους αισθητήρες τοποθετημένους κάτω από την επιφάνεια της γης	Το δίκτυο αποτελείται από ασύρματους αισθητήρες και οχήματα τοποθετημένα στη θάλασσα	Το δίκτυο αποτελείται από ασύρματους αισθητήρες που μπορούν να αποθηκεύουν δεδομένα πολυμέσων, όπως βίντεο, ήχο και εικόνες	Το δίκτυο αποτελείται από αισθητήρες που έχουν τη δυνατότητα να μετακινούνται
Πεδία έρευνας – Προβλήματα	Ελαχιστοποίηση κατανάλωσης ενέργειας, Βελτιστοποίηση κατανομής κατανάλωσης ενέργειας, Εύρεση βέλτιστης δρομολόγησης, Διατήρηση συνδεσιμότητας δικτύου, Βελτίωση επικοινωνίας Μείωση απαίτησης για εφεδρεία δικτύου	Μείωση κόστους εγκατάστασης και εξοπλισμού, Φθορά εξοπλισμού λόγω περιβάλλοντος και ζώνων, Προβλήματα τοπολογίας λόγω προσχεδιασμένης εγκατάστασης, Οι μπαταρίες δε μπορούν να αντικατασταθούν εύκολα, Εξασθένιση και απώλεια σήματος στην επικοινωνία	Μείωση κόστους εξοπλισμού, Φθορά εξοπλισμού λόγω φυσικών φαινομένων, Οι μπαταρίες δε μπορούν να αντικατασταθούν εύκολα, Αραιή τοποθέτηση Εξασθένιση και απώλεια σήματος στην επικοινωνία	Επεξεργασία, φιλτράρισμα και συμπίεση των δεδομένων εντός του δικτύου, Ευέλικτες αρχιτεκτονικές για υποστήριξη διαφορετικών εφαρμογών, Χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας Απαίτηση για ενσωμάτωση διαφορετικών ασύρματων τεχνολογιών	Έλεγχος και πλοήγηση κινητών αισθητήρων, Αυτοοργάνωση, Προσδιορισμός θέσης κατά την κίνηση, Ελαχιστοποίηση κατανάλωσης ενέργειας, Διατήρηση συνδεσιμότητας δικτύου, Κατανομή δεδομένων, Διαχείριση κίνησης
Εφαρμογές	Περιβαλλοντικές εφαρμογές, παρακολούθηση περιβάλλοντος, βιομηχανική παρακολούθηση, επίγειες έρευνες	Παρακολούθηση αγροτικής παραγωγής, παρακολούθηση υπόγειων τεχνικών έργων, παρακολούθηση υπόγειων υδάτων και ορυκτών πόρων, παρακολούθηση συνόρων	Παρακολούθηση πληθυσμών, ανίχνευση πυθμένα, παρακολούθηση σεισμικής δραστηριότητας, πρόληψη φυσικών καταστροφών, παρακολούθηση εξοπλισμού	Βοηθητικά/Υποστηρικτικά σε υπάρχοντα WSN	Περιβαλλοντικές εφαρμογές, στρατιωτικές εφαρμογές, εντοπισμός & διάσωση, εντοπισμός στόχων

Πίνακας 1.1: Κατηγορίες, πεδία έρευνας και εφαρμογές για κάθε είδος WSN (Yick, Mukherjee, & Ghosal, 2008)

1.8 Παράμετροι αξιολόγησης δικτύου γεωαισθητήρων

Η φύση του προβλήματος είναι αυτή που καθορίζει τις παραμέτρους οι οποίες θα αξιολογηθούν κατά το σχεδιασμό του δικτύου, αλλά και κατά την επιλογή της βέλτιστης λύσης. Σε κάθε περίπτωση όμως, εκτός από την αξιολόγηση και επιλογή του κάθε γεωαισθητήρα μεμονωμένα, είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη ορισμένες παράμετροι συνολικά, κατά το σχεδιασμό ολόκληρου του δικτύου. Μάλιστα, ανάλογα με την εφαρμογή, είναι δυνατόν να απαιτείται η μείωση της απόδοσης μιας παραμέτρου, προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση μιας άλλης.

Η διάρκεια ζωής ολόκληρου του δικτύου είναι άμεσα συνυφασμένη με τη διάρκεια ζωής κάθε κόμβου. Η διάρκεια ζωής κάθε εφαρμογής, ειδικά όσες αφορούν ευρείας κλίμακας παρακολούθηση, πρέπει να είναι αρκετοί μήνες ή χρόνια. Αυτό που είναι σημαντικό, δεν είναι η μέση διάρκεια ζωής κάθε κόμβου, αλλά η ελάχιστη.

Η αξιοπιστία/ εφεδρεία του δικτύου είναι ιδιαίτερης σημασίας, ειδικά σε εφαρμογές ευρείας κλίμακας. Αναφέρεται στο κατά πόσον η βλάβη ενός γεωαισθητήρα ή ενός δρομολογητή, μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση του δικτύου.

Σε ένα δίκτυο μεγάλο σε κάλυψη (και κόστος), το οποίο παρακολουθεί ένα φυσικό κίνδυνο (πυρκαγιά, μικρομετακινήσεις), θα πρέπει να υπάρχει μέριμνα για επιπλέον καλύψεις, ώστε να μειώνονται οι πιθανότητες μη έγκαιρης (ή καθόλου) καταγραφής και αποστολής της πληροφορίας.

Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με την εγκατάσταση επιπλέον των ελάχιστων απαιτούμενων αισθητήρων ή/και με την κατάλληλη επιλογή τοπολογίας, όπως θα αναλυθεί παρακάτω.

Για παράδειγμα, αν ένας δρομολογητής τεθεί εκτός λειτουργίας, τότε πρέπει όσο το δυνατόν περισσότεροι από τους αισθητήρες που εξυπηρετούνταν από αυτόν να μπορούν να στείλουν τα δεδομένα τους από άλλη διαδρομή. Δηλαδή, οι περισσότεροι αισθητήρες πρέπει να βρίσκονται στην εμβέλεια και άλλου δρομολογητή.

Αντίστοιχα αν κάποιος αισθητήρας αστοχήσει και συμβεί γύρω του ένα κρίσιμο γεγονός, τότε η απόσταση σε σχέση με τους γειτονικούς του πρέπει να είναι τέτοια ώστε να ανιχνευθεί και πάλι το γεγονός αυτό. Όπως γίνεται αντιληπτό, δίκτυα παρακολούθησης επικίνδυνων φυσικών φαινομένων πρέπει να έχουν υψηλό βαθμό αξιοπιστίας, για την αποφυγή μιας φυσικής καταστροφής.

Το κόστος ολόκληρου του δικτύου είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων. Το κόστος αγοράς κάθε αισθητήρα κατέχει σημαντικό ρόλο, καθώς ανάλογα με την κλίμακα της εφαρμογής μπορεί να χρειαστούν εκατοντάδες ή και χιλιάδες αισθητήρες.

Επίσης ο επιθυμητός βαθμός αξιοπιστίας/ εφεδρείας, δηλαδή η προσθήκη επιπλέον κόμβων από τους ελάχιστους απαιτούμενους, αυξάνει το κόστος.

Η προσθήκη περισσότερων σημείων εφεδρείας, αυξάνουν πολύ το κόστος όχι όμως ανάλογα και την τελική ζητούμενη αξιοπιστία, καθότι μια λύση "πλήρους αξιοπιστίας" συγκλίνει στην ταύτιση του κάθε αισθητήρα με ένα δρομολογητή, λύση κοστολογικά απαράδεκτη.

Γενικά η σχέση αξιοπιστίας και κόστους, είναι ανάλογη. Όσο πιο αξιόπιστο είναι ένα δίκτυο, τόσο πιο ακριβό είναι. Άλλοι παράγοντες που αυξάνουν τη συνολική δαπάνη, είναι το κόστος συντήρησης του δικτύου, αλλά και το κόστος παρακολούθησης και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων.

Οι άξονες με τους οποίους γίνεται η προσέγγιση του προβλήματος για την ανάπτυξη ενός WSN, συνδυάζουν αξιοπιστία και κόστος υλοποίησης. Σε κάθε περίπτωση αναζητείται μια καλή σχέση κόστους και αξιοπιστίας δικτύου. Δηλαδή αναζητείται η λύση ενός καλού και αξιόπιστου δικτύου σε λογικό κόστος.

Συνοπτικά, οι παράμετροι αξιολόγησης των δικτύων γεωαισθητήρων είναι:

- Η αξιοπιστία/εφεδρεία του δικτύου
- Η ταχύτητα μετάδοσης
- Η κατανάλωση ενέργειας
- Ο χρόνος ζωής
- Το πλήθος των αισθητήρων
- Το πλήθος των δρομολογητών
- Το κόστος του δικτύου

1.9 Εφαρμογές δικτύων αισθητήρων και γεωαισθητήρων

Όπως αναφέρθηκε τα δίκτυα αισθητήρων και γεωαισθητήρων, είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με την καταγραφή της πληροφορίας φυσικών (και όχι μόνο) φαινομένων, καθώς και χωρικής πληροφορίας. Βρίσκουν εφαρμογή σε ένα πλήθος επιστημονικών πεδίων (Garcia, Bri, Sendra, & Lloret, 2010). Επιπλέον λόγω μεγέθους, βάρους αλλά και χαμηλού πλέον κόστους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε μεγάλο εύρος κλίμακας, από εφαρμογές

περιορισμένου πεδίου, μέχρι παρακολούθηση φαινομένων σε εθνική ή διεθνή κλίμακα.

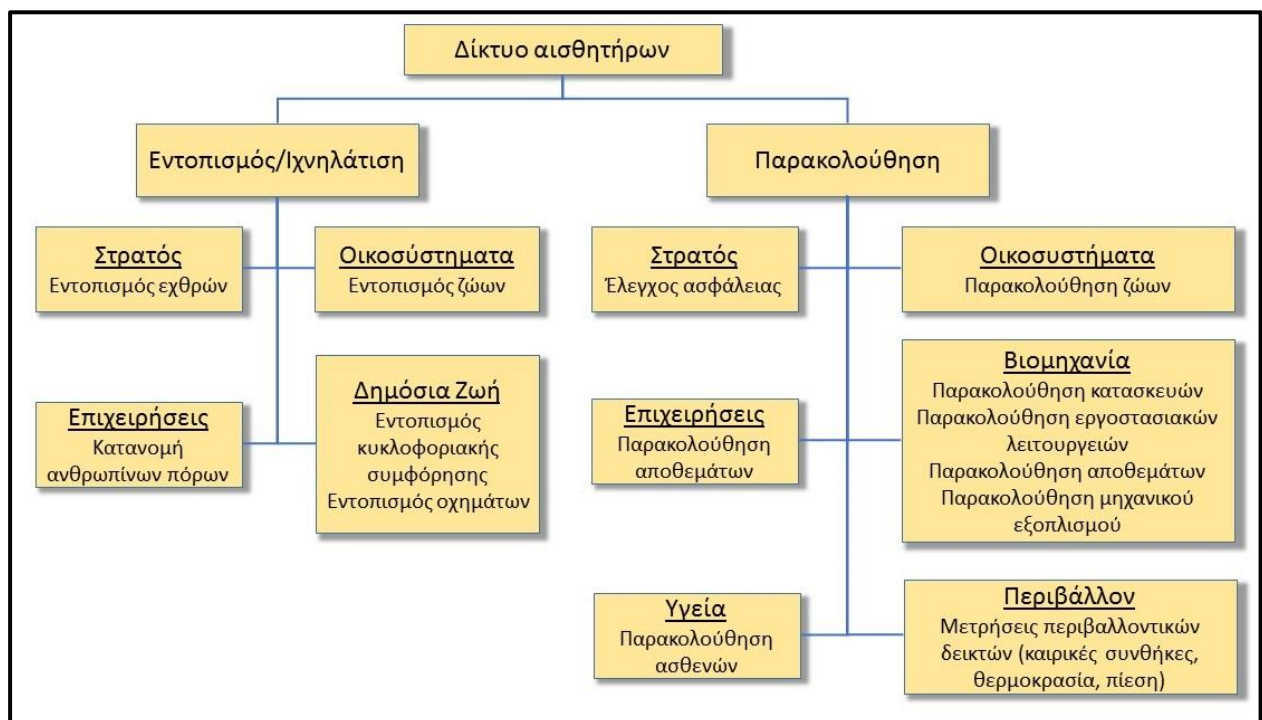
Οι εφαρμογές μπορούν να ενταχθούν σε δύο κύριες κατηγορίες:

α) παρακολούθηση (monitoring) και

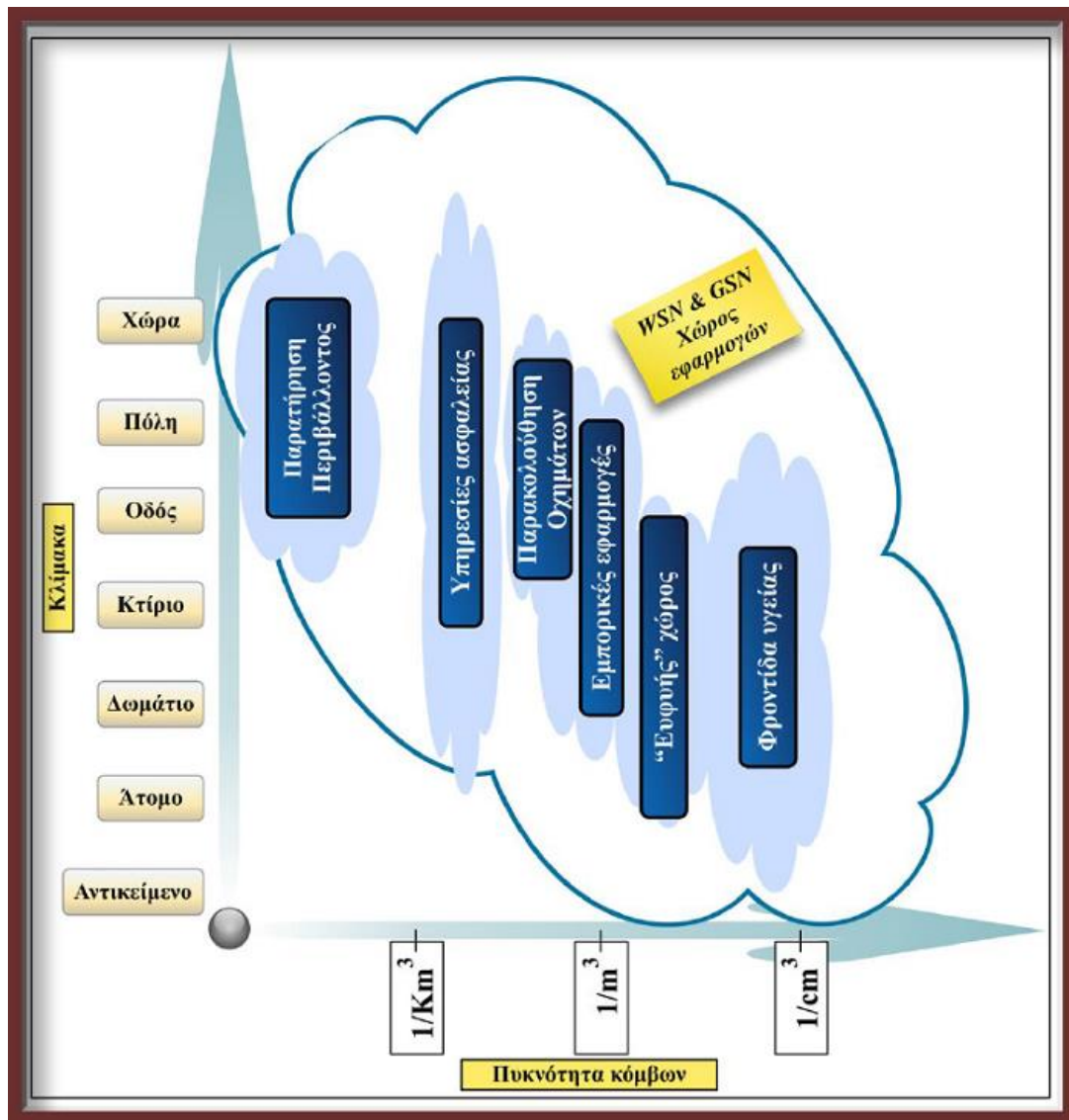
β) εντοπισμός/ιχνηλάτιση (tracking) (Yick, Mukherjee, & Ghosal, 2008).

Οι εφαρμογές παρακολούθησης περιλαμβάνουν παρακολούθηση εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, αποθεμάτων αποθήκης, σεισμικής δραστηριότητας, δομικών κατασκευών, υγείας κ.α.

Οι εφαρμογές ιχνηλάτισης, περιλαμβάνουν εντοπισμό αντικειμένων, ανθρώπων, ζώων ή οχημάτων. Στο σχήμα 1.3, παρατίθενται ενδεικτικά ορισμένα πεδία εφαρμογών, ανάλογα με τις δύο παραπάνω κύριες κατηγορίες, ενώ στο σχήμα 1.4, ανάλογα με την κλίμακα της εφαρμογής και την απαιτούμενη χωρική πυκνότητα των κόμβων.



Σχήμα 1.3: Εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων (Yick, Mukherjee, & Ghosal, 2008)



Σχήμα 1.4: Πεδία εφαρμογών των WSN ανάλογα με την κλίμακα του χώρου και την πυκνότητα των κόμβων (Δούκας, 2014)

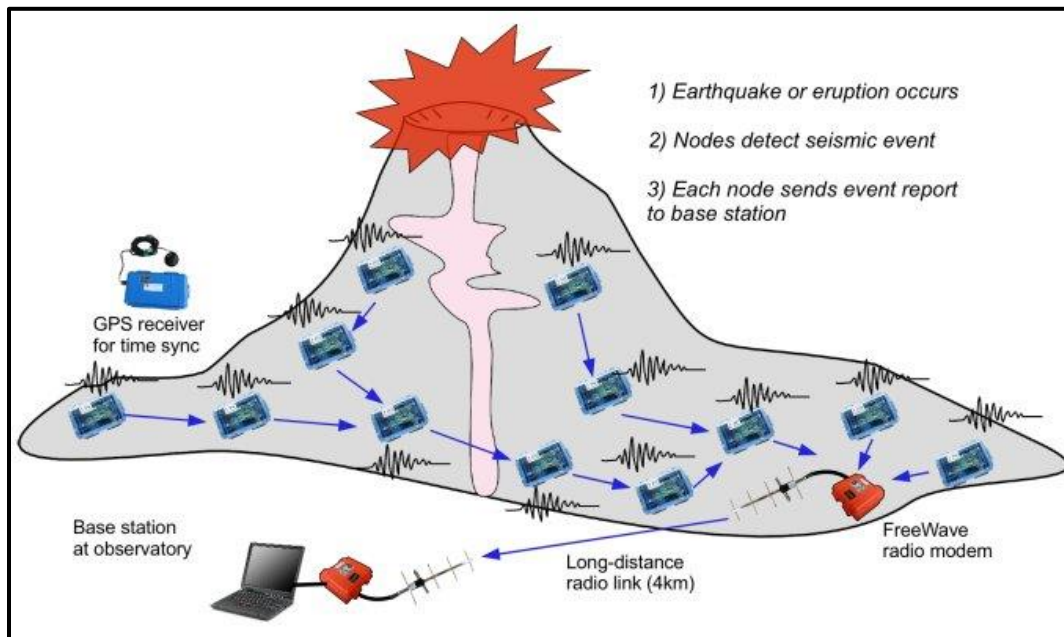
1.9.1 Γεωδαιτικές εφαρμογές

1.9.1.1 Παρακολούθηση μικρομετακινήσεων

Ένας σημαντικός κλάδος της γεωδαισίας, είναι οι εφαρμογές παρακολούθησης μικρομετακινήσεων, είτε τεχνικών έργων, είτε τμημάτων της φυσικής γήινης επιφάνειας (σεισμική δραστηριότητα, καταπτώσεις πρανών κ.α.). Συχνά δεν αρκεί μόνο η ίδρυση και μέτρηση δικτύων ελέγχου, αλλά και η παρακολούθηση και καταγραφή πλήθους άλλων παραμέτρων, όπως ρωγμές, ατμοσφαιρική πίεση, ταχύτητα ανέμου, θερμοκρασία κ.α. (σχήμα 1.5)

Η από κοινού ολοκληρωμένη επεξεργασία των δεδομένων αυτών και των γεωδαιτικών μετρήσεων (data fusion), μπορεί να δώσει χρήσιμα

συμπεράσματα, αλλά και έγκαιρη πρόληψη από πιθανές αστοχίες (Ardalan & Jafari, 2012), (Chmelina & Kahmen, 2003).



Σχήμα 1.5: Αναπαράσταση GSN για ανίχνευση μικρομετακινήσεων (<http://fiji.eecs.harvard.edu/>, 2015)

Για παράδειγμα στην παρακολούθηση παραμορφώσεων μιας γέφυρας, μιας σήραγγας ή ενός φυσικού πρानούς, μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμη η εγκατάσταση ενός δικτύου αισθητήρων υγρασίας ή θερμοκρασίας, ώστε πιθανές παραμορφώσεις να μπορούν όχι μόνο να ανιχνευθούν, αλλά και να ερμηνευθούν αξιοποιώντας τις διακυμάνσεις των τιμών των μεγεθών αυτών.

Αντίστοιχα, εξαιρετικά σημαντική είναι η εγκατάσταση ενός δικτύου και μέσω αυτού η παρακολούθηση της σεισμικής δραστηριότητας που προκαλείται από ενεργά ηφαίστεια. (Werner-Allen, Johnson, Ruiz, Lees, & Wlesch, 2005)

Οι κατασκευές γίνονται όλο και πιο περίπλοκες, οι απαιτήσεις αυξάνονται και οι προκλήσεις μεγαλώνουν. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στην παρακολούθηση συμπεριφοράς κατασκευών (GPS, επιταχυνσιόμετρα, κλισίμετρα, RTS κ.α.) παρέχουν, ο καθένας διαφορετικό μετρούμενο μέγεθος, με διαφορετικές συχνότητες δειγματοληψίας και με διαφορετική ακρίβεια.

Έτσι ο συνδυασμός διαφορετικών αισθητήρων σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα είναι απαραίτητος, αφενός για τη συνεισφορά του κάθε αισθητήρα (σημείο τοποθέτησης, ρυθμός δειγματοληψίας, ακρίβεια) και αφετέρου για να ξεπεραστούν οι αδυναμίες κάθε αισθητήρα. Ο συνδυασμός διαφορετικών αισθητήρων προϋποθέτει την ύπαρξη κατάλληλου λογισμικού, που να μπορεί

να συλλέξει, να συγχρονίσει, να διαχειρισθεί και να αναλύσει τα διαφορετικού τύπου δεδομένα, ώστε να είναι δυνατή η εξαγωγή των επιθυμητών κάθε φορά πληροφοριών. (Σαραφιάν, 2012), (Di Mauro & Van Cravenbroeck, 2012)

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το λογισμικό παρακολούθησης παραμορφώσεων της εταιρίας Leica, GeoMoS. Το λογισμικό έχει ενσωματώσει τη δυνατότητα συλλογής, ανάλυσης, επεξεργασίας και οπτικοποίησης της πληροφορίας που λαμβάνει. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει δεδομένα όχι μόνο από γεωδαιτικά όργανα (ολοκληρωμένους γεωδαιτικούς σταθμούς, GPS), αλλά και από ένα πλήθος άλλων αισθητήρων όπως γεωτεχνικά όργανα (εξτενσιόμετρα, πιεζόμετρα, ινκλινόμετρα κ.α.), βροχόμετρα, θερμόμετρα κ.α. Παλαιότερα τα δεδομένα διαφορετικών δεκτών - αισθητήρων συλλέγονταν και αξιολογούνταν ξεχωριστά, δίνοντας διαφορετικά συμπεράσματα. (Leica Geosystems, 2010), (<http://www.leica-geosystems.com>, 2015)

Ένα άλλο χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι εργασίες συντήρησης που γίνονται στην Ακρόπολη από την Υπηρεσία Συντήρησης Μνημείων Ακρόπολης (ΥΣΜΑ).

Το περιμετρικό τείχος της Ακρόπολης έχει κατασκευαστεί σε διάφορα στάδια από την κλασική έως την οθωμανική περίοδο. Στην διάρκεια του χρόνου έχει υποστεί πολλές φθορές και σήμερα παρουσιάζονται εκτεταμένες ρηγματώσεις. Στο πλαίσιο διερεύνησης της δομικής συμπεριφοράς του Τείχους υλοποιήθηκε ένα πρόγραμμα ενόργανης παρακολούθησής του.

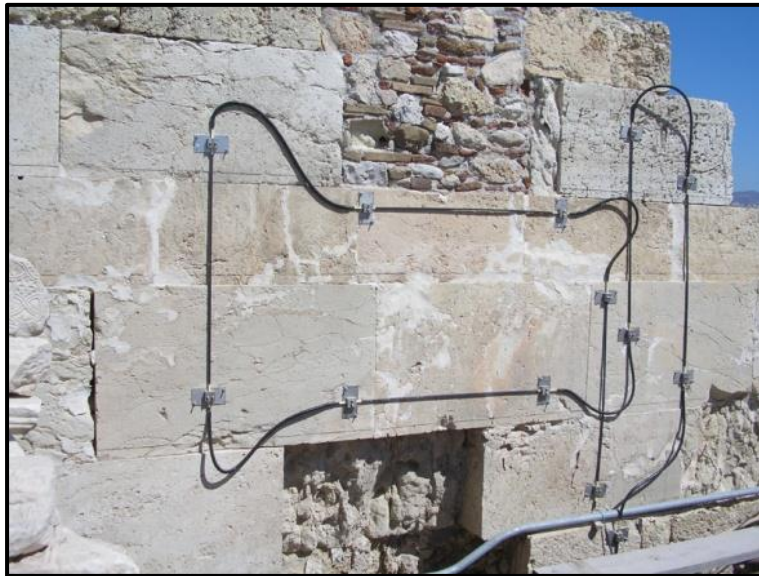
Μεταξύ άλλων, το διάστημα 2006-2008 είχαν εγκατασταθεί μόνιμα 46 πρίσματα στο νότιο και ανατολικό τοίχος, τα οποία και παρακολουθούνταν. Οι μετρήσεις προς τα πρίσματα πραγματοποιήθηκαν από 2 σταθερά σημεία και εκτελέστηκαν 20 σειρές μετρήσεων – μία κάθε μήνα – από το Νοέμβριο του 2006, έως τον Ιούνιο του 2008. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν κατά τη διάρκεια της νύχτας (εικόνα 1.2). Παρακολουθούνταν το νότιο τοίχος σε μήκος περίπου 155 μ. από τη νοτιοανατολική γωνία και τμήμα του ανατολικού τοίχους σε απόσταση 12 μ. από την ίδια γωνία. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων λαμβάνονταν επίσης η θερμοκρασία και η ατμοσφαιρική πίεση.

Από την επεξεργασία των μετρήσεων, προέκυψαν οι συντεταγμένες των σημείων και τα διαγράμματα μετατόπισης των σημείων στις τρεις διαστάσεις X, Y, Z για κάθε σειρά μετρήσεων. Η επεξεργασία δεν έδειξε σημαντικές μετακινήσεις των σημείων. (Μανιδάκη, Ηλιόπουλος, Παρτσινέβελος, & Λελούδας, 2010)



Εικόνα 1.2: Προσδιορισμός παραμορφώσεων με ολοκληρωμένο γεωδαιτικό σταθμό

Ταυτόχρονα τοποθετήθηκαν πιλοτικά αισθητήρες οπτικών ινών, για τη μέτρηση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων λόγω μηχανικών ή θερμικών αιτιών, σε χαρακτηριστικές περιοχές του τείχους. (εικόνα 1.3) (<http://www.ysma.gr>, 2011)



Εικόνα 1.3: Αισθητήρες οπτικών ινών για μέτρηση παραμορφώσεων

Οι αισθητήρες οπτικών ινών αποτελούν την πλέον εξελιγμένη τεχνολογικά μέθοδο που αφορά σε μετρήσεις παραμορφώσεων και προσφέρουν υψηλή ακρίβεια μέτρησης. Από την Υπηρεσία έχει γίνει προμήθεια δυναμικών συσκευών καταγραφής ώστε να είναι δυνατή η λήψη καταγραφών και σε περίπτωση δυναμικών φαινομένων (π.χ. σεισμός).

Οι αισθητήρες οπτικών ινών είναι ενσωματωμένοι σε ειδικές ράβδους μήκους περίπου ενός μέτρου. Οι θέσεις έχουν επιλεγεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση της διάδοσης των υπαρχουσών ρωγμών. Συνολικά, εγκαταστάθηκαν 128 αισθητήρες. Το εντατικό πεδίο που προκύπτει από τις μετρήσεις συγκρίνεται με τα αποτελέσματα 3-D ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Η εν λόγω ανάλυση πραγματοποιήθηκε για να ερευνηθεί τους πιθανούς τρόπους αστοχίας του Τείχους, όπως αυτοί ορίζονται από την ενόργανη παρακολούθηση. Με το συσχετισμό μετρήσεων και αναλύσεων προκύπτει ένα λειτουργικό πρότυπο της δομικής συμπεριφοράς του τείχους και ένα εργαλείο για την ερμηνεία της δομικής παθολογίας του. (Αστρεϊνίδης & Εγγλέζος, 2008)

1.9.1.2 Γεωμετρική τεκμηρίωση κατασκευών

Πολλές είναι οι περιπτώσεις κατά τις οποίες ο Τοπογράφος Μηχανικός καλείται να καταγράψει τη θέση, το μέγεθος και τη μορφή μιας κατασκευής, σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα παραγόμενα προϊόντα αξιολογούνται και αξιοποιούνται από επιστήμονες άλλων ειδικοτήτων, όπως αρχιτέκτονες, αρχαιολόγους, γεωτεχνικούς κ.α.

Όπως και στην περίπτωση των παραμορφώσεων, είναι πιθανό η μορφή της κατασκευής να επηρεάζεται από φυσικούς παράγοντες (θερμοκρασία, υγρασία κ.α.) ή ακόμα και από χημικούς (ατμοσφαιρική ρύπανση, εκπομπές αερίων κ.α.). Έτσι η πλήρης τεκμηρίωση της κατασκευής, απαιτεί όχι μόνο τη γεωμετρική υπόσταση αυτής, αλλά και τη χρονική και χωρική αλληλεπίδρασή της με τους εξωτερικούς παράγοντες που πιθανόν την επηρεάζουν. (π.χ. πώς επηρεάζονται τα δομικά υλικά της, σε σχέση με την υγρασία σε διαφορετικά τμήματα της κατασκευής). (Heinrichs & Azzam, 2012), (Mecocci & Abrardo, 2014), (D' Amato, Gamba, & Goldoni, 2012), (Rizzi, Voltolini et al., 2007).

1.9.2 Περιβαλλοντικές εφαρμογές

1.9.2.1 Ανίχνευση πυρκαγιών

Εξαιρετικά σημαντική είναι η συνεισφορά των δικτύων γεωαισθητήρων στην έγκαιρη ανίχνευση πυρκαγιών (Kolega, Vescoukis, & Douligeris, 2010), (Yu, Wang, & Meng, 2005) (Alkhatib, 2013), (Bolourchi & Uysal, 2013).

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας ή καπνού διασκορπίζονται είτε από αέρος, είτε τοποθετούνται σε προεπιλεγμένες θέσεις (συνήθως πάνω σε δέντρα).

Συλλέγουν συνεχώς δεδομένα, είτε ενεργοποιούνται όταν ανιχνευθεί αύξηση στα αναμενόμενα μεγέθη και ενημερώνουν το κέντρο ελέγχου, εκπέμποντας συναγερμό. Αν το δίκτυο έχει μεγάλη πυκνότητα κόμβων, τότε μπορεί να εντοπισθεί ακριβώς η εστία της πυρκαγιάς προτού προλάβει να εξαπλωθεί. Οι κόμβοι μπορούν να είναι εφοδιασμένοι με αποτελεσματικές τεχνικές συλλογής ενέργειας, όπως για παράδειγμα ηλιακούς συλλέκτες, για να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. (εικόνα 1.4)



Εικόνα 1.4: Γεωαισθητήρες για ανίχνευση πυρκαγιών

Το 2009 ξεκίνησε το Ευρωπαϊκό έργο “Firesense”. Στο πλαίσιο του έργου Έλληνες ερευνητές, σε συνεργασία με επιστήμονες από την Ιταλία, την Τουρκία και την Τυνησία, ανέπτυξαν ένα αυτόματο σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης για την προστασία χώρων μεγάλης πολιτιστικής και αρχαιολογικής σημασίας από πυρκαγιά ή άλλα φυσικά φαινόμενα. Το σύστημα χρησιμοποιεί ένα ασύρματο δίκτυο με διαφορετικά είδη αισθητήρων και συνδυάζοντας τεχνολογίες, όπως για παράδειγμα οπτικές και υπέρυθρες κάμερες σε διαφορετικά φάσματα, μετράει διάφορα μεγέθη, όπως τη θερμοκρασία και άλλα μετεωρολογικά δεδομένα. (<http://www.firesense.eu/>, 2016)

Αντίστοιχα, το 2006 αναπτύχθηκε το “Firementor”, ένα ολοκληρωμένο σύστημα σχεδιασμού και υποστήριξης αποφάσεων για διαχείριση δασικών πυρκαγιών. Βασίζεται στη θεώρηση ότι η διαχείριση κρίσης ξεκινά πολύ πριν από την εκδήλωσή της και περιλαμβάνει το σχεδιασμό και την υποστήριξη αποφάσεων μεταξύ άλλων στις εξής κατευθύνσεις: επιχειρησιακή ετοιμότητα, εκπόνηση σεναρίων συμβάντων και επιπτώσεων, ενέργειες πρόληψης, σχεδιασμός δράσης. Ανάμεσα στα άλλα χαρακτηριστικά του συστήματος έχει δημιουργηθεί ένα δίκτυο από αναλώσιμους αισθητήρες πυρκαγιάς τοποθετημένους πάνω σε δέντρα. Κάθε αισθητήρας διαθέτει ηλεκτρονικό

θερμόμετρο, μονάδα ασύρματης επικοινωνίας και μικροϋπολογιστή. Σε καθοριζόμενα χρονικά διαστήματα μεταδίδει στο περιβάλλον του ένα μήνυμα κατάστασης, το οποίο μεταφέρεται μέσω των άλλων αισθητήρων σε κεντρικούς κόμβους που με τη σειρά τους διαβιβάζουν την κατάσταση ολόκληρου του δικτύου στο κεντρικό κόμβο του συστήματος.

Έτσι, είναι γνωστή σε πραγματικό χρόνο η κατανομή της θερμοκρασίας στο δάσος. Σε περίπτωση πυρκαγιάς ο αισθητήρας καταστρέφεται έχοντας πρώτα αποστείλει κωδικοποιημένο μήνυμα το οποίο φτάνει στον κεντρικό κόμβο του συστήματος. Κατόπιν το δίκτυο αναδιοργανώνεται αυτόματα ώστε και πάλι όλα τα μηνύματα να φτάνουν στον παραλήπτη τους. (Μαρκάτος, Βεσκούκης, & Κυρανούδης, 2008)

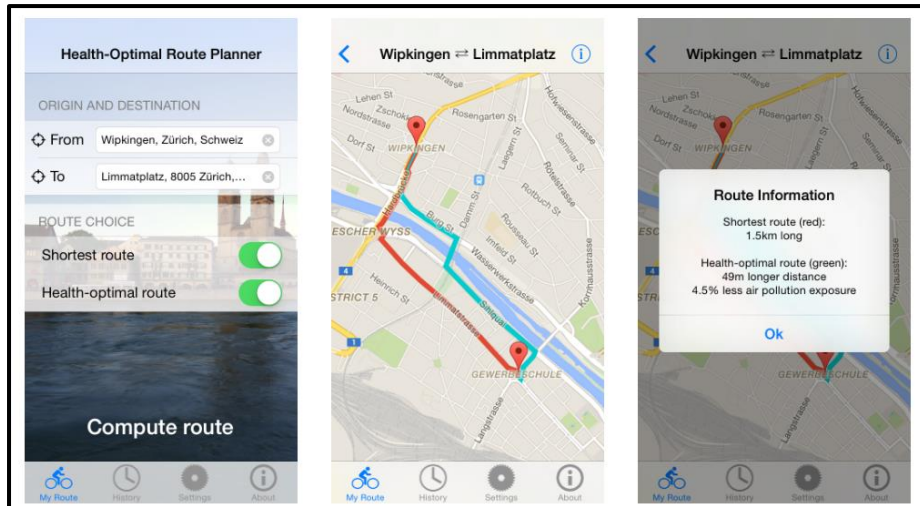
1.9.2.2 Ατμοσφαιρική ρύπανση

Η ολοένα και αυξανόμενη ρύπανση της ατμόσφαιρας τα τελευταία χρόνια, απόρροια κυρίως των ανεξέλεγκτων βιομηχανικών ρύπων, είναι επιζήμια για την ανθρώπινη υγεία.

Λύση και σε αυτό το πρόβλημα έχουν δώσει τα ασύρματα δίκτυα γεωαισθητήρων. Ήδη σε πολλές πόλεις χρησιμοποιούνται GSN για την παρακολούθηση της μόλυνσης του περιβάλλοντος, μέσω της καταγραφής των ατμοσφαιρικών ρύπων. Η επιλογή αισθητήρων αερίου καθώς και η εγκυρότητα των μετρήσεων των αισθητήρων επηρεάζουν καθοριστικά τα αποτελέσματα και την επιτυχία γενικότερα του συστήματος.

Ένα φιλόδοξο πρόγραμμα είναι το OpenSense, το οποίο αναπτύχθηκε από τα Πολυτεχνεία της Ζυρίχης (ETH Zurich) και της Λοζάνης (École polytechnique fédérale de Lausanne). (<http://www.opensense.ethz.ch/trac/>, 2016).

Στοχεύει στην ανάλυση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα και βασίζεται στη συγκέντρωση δεδομένων από ετερογενείς πηγές και κυρίως πηγές που βρίσκονται σε μέσα μαζικής μεταφοράς. Με τον τρόπο αυτό παρέχονται δεδομένα με υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση, ανοίγοντας έτσι νέες ευκαιρίες για τη μελέτη του ατμοσφαιρικού αέρα στα μεγάλα αστικά κέντρα. Η ανάλυση των δεδομένων έχει ως παραγόμενο προϊόν, χάρτες υψηλής ποιότητας με την ποιότητα του αέρα των πόλεων. Στο πλαίσιο του προγράμματος, έχει αναπτυχθεί εφαρμογή για κινητά τηλέφωνα ή οποία υπολογίζει την πορεία προς τον επιθυμητό προορισμό, μέσω της διαδρομής με τους λιγότερους ρύπους. (εικόνα 1.5)



Εικόνα 1.5. Εύρεση της διαδρομής με τους λιγότερους ρύπους

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό παράδειγμα πόλης που συλλέγει και αξιοποιεί τα δεδομένα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι η Σέρβικη πόλη Πάντσεβο. Το έργο EcoBus χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση, στο πλαίσιο του προγράμματος FIRE και αναπτύχθηκε σε συνεργασία με την Ericsson. Το 2010 εγκαταστάθηκε σε 60 δημόσια λεωφορεία ένα δίκτυο γεωαισθητήρων, το οποίο παρακολουθεί μια σειρά περιβαλλοντικών παραμέτρων σε ολόκληρη την πόλη (εικόνα 1.6). Τα μεγέθη που καταγράφονται είναι: θερμοκρασία, σχετική υγρασία, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα και διοξείδιο του αζώτου. Τα οχήματα είναι εφοδιασμένα με δέκτες GPS, ώστε να είναι γνωστή και η θέση τους κάθε χρονική στιγμή. Τα δεδομένα που συλλέγονται στις διάφορες θέσεις αποστέλλονται στο κέντρο ελέγχου για επεξεργασία και αποθήκευση. Επιπλέον είναι διαθέσιμα σε πραγματικό χρόνο, σε ένα διαδραστικό χάρτη, ο οποίος είναι προσβάσιμος σε όλους ακόμα και από κινητό τηλέφωνο. Το σύστημα παρέχει στο χρήστη επιπλέον πληροφορίες, όπως η θέση των λεωφορείων και η εκτιμώμενη ώρα άφιξης στις στάσεις. (Brkovic & Sretovic, 2012)



Εικόνα 1.6: MMM εφοδιασμένα με γεωαισθητήρες

1.9.3 Μεταφορές

1.9.3.1 Έλεγχος μεταφορών και συγκοινωνιών

Η αξιοποίηση των GSN συμβάλει στον τομέα των μεταφορών και συγκοινωνιών (Wen, Pan, & Le. J, 2007), (Karpis, 2013), (Nellore & Hancke, 2016). Τα δίκτυα των γεωαισθητήρων μπορούν να ελέγχουν με μεγαλύτερη ακρίβεια την κυκλοφορία των οχημάτων ώστε να εξασφαλίζεται η ασφαλής οδήγηση, η μείωση των ατυχημάτων και ο έλεγχος των ορίων ταχύτητας. Η συνεργασία των δικτύων GPS για τα οχήματα με τον εξοπλισμό GSN, είναι ικανή να οδηγήσει στην υλοποίηση πολλών χρήσιμων εφαρμογών για το χρήστη, όπως η αυτόματη ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των μεμονωμένων οχημάτων για διάφορες συνθήκες, όπως οι συνθήκες οδήγησης και περιβάλλοντος, που πρωτοσυναντά ο προπορευόμενος.

1.9.3.2 Παρακολούθηση στόλου οχημάτων

Η βασική ιδέα σε αυτή την περίπτωση είναι η εγκατάσταση ενός δικτύου γεωαισθητήρων στο στόλο οχημάτων, σε συνδυασμό και πάλι με δέκτες του συστήματος GPS, ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση τόσο της θέσης τους, όσο και παραμέτρων που σχετίζονται με το ίδιο το όχημα και το περιβάλλον του.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί ποικίλα λογισμικά παρακολούθησης και καθοδήγησης μηχανημάτων από απόσταση με διαφορετικές δυνατότητες. Ένα από αυτά είναι το Tierra της εταιρίας Topcon (εικόνα 1.7). Το συγκεκριμένο λογισμικό μέσω της εγκατάστασης ενός δικτύου αισθητήρων στο στόλο οχημάτων δίνει τηλεματικά πληροφορίες, σε πραγματικό χρόνο, για ένα πλήθος παραμέτρων, όπως τη θέση κάθε οχήματος, την κατανάλωση καυσίμου, το χρόνο λειτουργίας και την κατάσταση της μηχανής, αλλά και εικόνα/ήχο από το χώρο κίνησης του οχήματος. Τέλος δίνει τη δυνατότητα απομακρυσμένης ακινητοποίησης του οχήματος, παρέχοντας επιπλέον ασφάλεια. Έτσι μπορεί να βρει πλήθος εφαρμογών σε εταιρίες με εργοταξιακά οχήματα, εταιρίες logistics, γεωργικούς συνεταιρισμούς, στη ναυτιλία κ.α.

(<https://www.topconpositioning.com>, 2016)



Εικόνα 1.7: Στιγμιότυπο από λογισμικό παρακολούθησης στόλου

1.9.4 Άλλες εφαρμογές

1.9.4.1 Εφαρμογές εθνικής ασφάλειας

Η ευκολία τοποθέτησης και η ιδιότητα αυτο-οργάνωσης των κόμβων αισθητήρων, είναι τα βασικά χαρακτηριστικά των δικτύων γεωαισθητήρων που τα καθιστούν ιδανικά για στρατιωτικές εφαρμογές (Djurisic, Tafa, Dimic, & Milutinovic, 2012), (Felemban, 2013), (Alkathami, 2015). Ορισμένες τέτοιες εφαρμογές είναι:

- Παρακολούθηση συνόρων. Μέσω αισθητήρων κίνησης, ήχου ή θερμοκρασίας, είναι δυνατόν να ελέγχονται τα χερσαία σύνορα μιας χώρας για δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα πλησίον αυτών, όπως για παράδειγμα, παράνομη παραβίαση των συνόρων.
- Ανίχνευση και αναγνώριση πυρηνικής, βιολογικής και χημικής επίθεσης. Σε περίπτωση βιολογικής και χημικής επίθεσης έχει μεγάλη σημασία για την έγκαιρη και έγκυρη ενημέρωση, η ύπαρξη πληροφοριών από το σημείο της επίθεσης. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs) μπορούν να λειτουργήσουν ως συστήματα ανίχνευσης τέτοιων επιθέσεων, συμβάλλοντας έτσι στην ασφάλεια των πολιτών.
- Παρακολούθηση συμμαχικών δυνάμεων, στρατιωτικού εξοπλισμού και πυρομαχικών. Κάθε στρατιώτης, όχημα, εξοπλισμός και πυρομαχικό μπορεί να εφοδιάζεται με ένα κόμβο αισθητήρων ώστε να μπορούν οι ανώτεροι να είναι ενήμεροι ανά πάσα στιγμή για τη διαθεσιμότητά τους.

- Παρακολούθηση πεδίου μάχης. Κάθε κρίσιμο πεδίο μάχης, καθώς και οι διαδρομές πρόσβασης στα στρατόπεδα μπορούν να παρακολουθούνται μέσω κόμβων αισθητήρων, ώστε να είναι άμεσα αντιληπτές οι κινήσεις των εχθρικών δυνάμεων.
- Αποτίμηση ζημιάς μάχης. Μετά το πέρας μιας μάχης, μπορεί να εγκατασταθεί ένα WSN στην περιοχή, το οποίο θα συλλέξει δεδομένα σχετικά με τις ζημιές.

1.9.4.2 Γεωργία

Η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει θετική επίδραση και στον τομέα της γεωργίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επικρατεί μια νέα τάση γνωστή ως “satellite farming” ή “site specific crop management”. Η χρήση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων στη γεωργία υπαγορεύτηκε ιδιαίτερα από την ανάγκη χρήσης συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων καθώς οι έως τώρα μέθοδοι κόστιζαν αρκετά σε χρόνο, αλλά και σε χρήματα στους αγρότες. (Bencini, Di Palma, Collodi, Manes, & Manes, 2010), (Zhu, Song, & Dong, 2011), (Ojha, Misra, & Raghuwanshi, 2015).

Μέσω δικτύων γεωαισθητήρων, κατανεμημένων κατάλληλα, επιτυγχάνεται ακριβής άρδευση και τοποθέτηση λιπάσματος με χρήση κόμβων που αισθάνονται την υγρασία και τη σύνθεση του εδάφους (εικόνα 1.8).



Εικόνα 1.8: Παρακολούθηση σοδειάς με GSN

Επιπλέον, τα WSNs παρακολουθούν τα επίπεδα των εντομοκτόνων στο πόσιμο νερό, της διάβρωσης του εδάφους και της μόλυνσης του αέρα σε πραγματικό χρόνο. Τέλος, έχουν εφαρμογή και στην εκτροφή ζώων, όπου κάθε ζώο φέρει έναν κόμβο αισθητήρων που παρατηρεί τα ζωτικά σημεία του (πχ θερμοκρασία σώματος, αριθμός βημάτων κ.α.) και ειδοποιεί σε περίπτωση υπέρβασης προκαθορισμένων κατωφλίων.

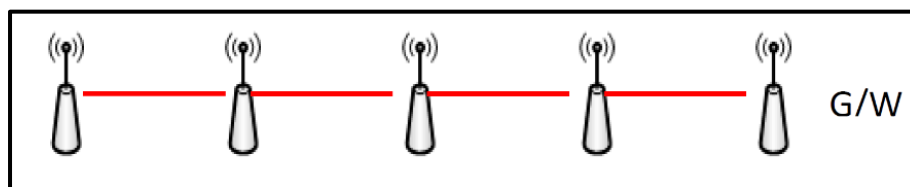
1.10 Τοπολογία δικτύου γεωαισθητήρων

Η επιλογή της τοπολογίας του δικτύου είναι καθοριστικής σημασίας για την επιτυχία του. Έτσι λοιπόν, αναλύονται διαφορετικές τοπολογίες ώστε να γίνει κατανοητό γιατί τελικά βέλτιστη είναι η τοπολογία κυψέλης. Καταγράφοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, προκύπτει ότι αυτή ανταποκρίνεται όσο το δυνατόν καλύτερα σε εφαρμογές ευρείας κλίμακας σε αφιλόξενα περιβάλλοντα.

Κάθε τοπολογία εξετάζεται με βάση τη χρηστικότητα και την πολυπλοκότητά της. Όσο πιο περίπλοκη σε πλήθος κόμβων και είδος δρομολόγησης είναι μια τοπολογία τόσο αυξάνεται η πολυπλοκότητά της. (Κολεγά, 2014), (Sharma, Verma, & Sharma, 2013)

1.10.1 Τοπολογία αρτηρίας - Bus

Είναι η απλούστερη μορφή τοπολογίας ενός δικτύου. Οι κόμβοι (αισθητήρες) συνδέονται σειριακά και κάθε ένας μεταδίδει στο διπλανό κόμβο τα δεδομένα, μέχρις ότου αυτά να φτάσουν στο δρομολογητή (Gateway). (σχήμα 1.6)



Σχήμα 1.6: Τοπολογία αρτηρίας

Η τοπολογία αρτηρίας είναι σχετικά εύκολο να εγκατασταθεί, αλλά ενδείκνυται μόνο για δίκτυα μικρού μεγέθους.

Το μεγάλο μειονέκτημα είναι το γεγονός ότι η επικοινωνία γίνεται σειριακά, και τα δεδομένα πρέπει να περάσουν από όλους τους ενδιαμέσους κόμβους μέχρι να φτάσουν στο δρομολογητή. Έτσι πιθανή βλάβη σε κάποιο κόμβο

(αισθητήρα) του δικτύου ή διακοπή επικοινωνίας μεταξύ δύο διαδοχικών κόμβων, έχει ως αποτέλεσμα να καταρρεύσει το δίκτυο. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να φτάνουν στο δρομολογητή μόνο τα δεδομένα από κόμβους που βρίσκονται μεταξύ αυτού και του σημείου κατάρρευσης.

Επιπλέον, ο όγκος της πληροφορίας που μεταδίδεται αυξάνει αθροιστικά, όσο αυτή πλησιάζει προς το δρομολογητή, καθώς κάθε κόμβος μεταδίδει την πληροφορία που προέρχεται από αυτόν, αλλά και την πληροφορία από όλους τους προηγούμενους του. Αυτό έχει ως επακόλουθο να αυξάνεται και η κατανάλωση ενέργειας στους κόμβους αυτούς.

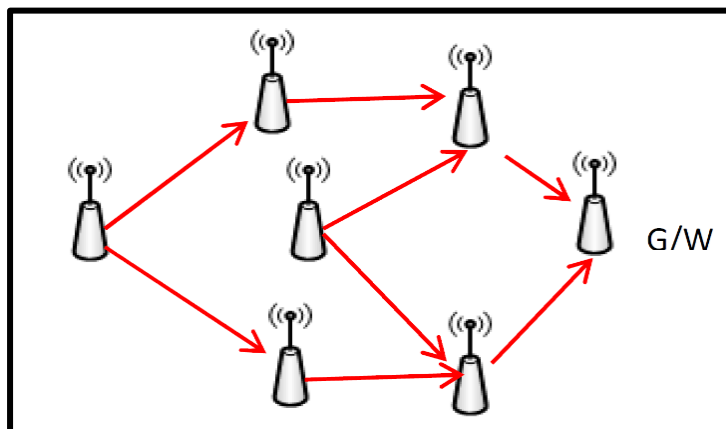
Ένα ακόμα μειονέκτημα είναι η ταχύτητα αποστολής δεδομένων, η οποία μειώνεται σταδιακά, όσο αυξάνεται ο όγκος της πληροφορίας που μεταδίδεται.

Σε ότι αφορά την εφεδρεία και αξιοπιστία του δρομολογητή, αυτή μπορεί να επιτευχθεί με προσθήκη μιας επιπλέον συσκευής στο δεύτερο άκρο της αρτηρίας και αποστολή των δεδομένων από τους αισθητήρες και προς τις δύο κατευθύνσεις.

Συνοψίζοντας, η τοπολογία αυτή χαρακτηρίζεται από έλλειψη αξιοπιστίας και εφεδρείας, χαμηλές ταχύτητες μετάδοσης, όσο αυξάνει ο όγκος δεδομένων και αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και συνεπώς απορρίπτεται για εφαρμογές ευρείας κλίμακας.

1.10.2 Τοπολογία δακτυλίου - Ring

Στα δίκτυα με τοπολογία δακτυλίου κάθε κόμβος έχει δύο γειτονικούς, με τους οποίους και επικοινωνεί (σχήμα 1.7). Σε αντίθεση με τα ενσύρματα δίκτυα, όπου η πληροφορία μεταδίδεται προς μια κατεύθυνση μέσα στο δακτύλιο, στα ασύρματα δίκτυα, ο δακτύλιος δημιουργείται από 2 δίκτυα αρτηρίας, ενωμένα στις άκρες τους.



Σχήμα 1.7: Τοπολογία δακτυλίου

Οι αισθητήρες αποστέλλουν τα δεδομένα τους, στους γειτονικούς αισθητήρες. Αν το σήμα δε μπορέσει να μεταδοθεί από τον έναν, θα μεταδοθεί από τον άλλο. Έτσι λοιπόν, το δίκτυο καταρρέει όταν υπάρξει κατάρρευση σε δύο σημεία αυτού, είτε λόγω βλάβης, είτε λόγω αδυναμίας συνδεσιμότητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η τοπολογία δακτυλίου να παρουσιάζει μεγαλύτερο βαθμό εφεδρείας και αξιοπιστίας σε σχέση με την τοπολογία αρτηρίας.

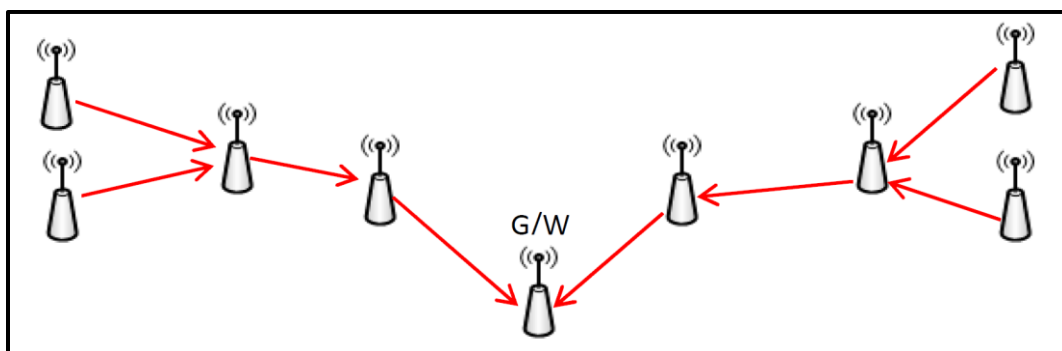
Και σε αυτή την περίπτωση σημαντικό μειονέκτημα είναι η ταχύτητα μετάδοσης της πληροφορίας προς τον δρομολογητή, καθώς αυτή εξαρτάται από τον αριθμό των ενδιάμεσων κόμβων. Αντίστοιχα οι αισθητήρες που βρίσκονται πλησιέστερα στο δρομολογητή, είναι οι κρίσιμοι κόμβοι του δικτύου, καθώς σε αυτούς συγκεντρώνονται τα δεδομένα των υπολοίπων, με αποτέλεσμα αυτοί και πάλι να καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια, γεγονός που όπως αναφέρθηκε αποτελεί κρίσιμο παράγοντα σε τέτοιες εφαρμογές.

Η εφεδρεία του δρομολογητή μπορεί να βελτιωθεί τοποθετώντας έναν επιπλέον δρομολογητή κατά μήκος του δακτυλίου και συμμετρικά του πρώτου. Παρόλ' αυτά η ίδια η δομή της τοπολογίας αφήνει σημαντικό τμήμα εντός του δακτυλίου χωρίς την ύπαρξη κόμβων και συνεπώς τμήματα επιφάνειας χωρίς καταγραφή πληροφορίας. Σε ότι αφορά το κόστος, απαιτούνται αισθητήρες με δυνατότητα όχι μόνο να μεταδίδουν πληροφορία, αλλά και να μπορούν να τη λάβουν από γειτονικούς, ενώ παράλληλα αυξάνεται η πολυπλοκότητα του δικτύου σε προγραμματιστικό και επίπεδο διαχείρισης.

Έτσι και η συγκεκριμένη τοπολογία, κρίνεται αναποτελεσματική.

1.10.3 Τοπολογία πολλαπλών κόμβων

Η τοπολογία πολλαπλών κόμβων (multihop) παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με τις τοπολογίες αρτηρίας και δακτυλίου. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.8, οι αισθητήρες δεν ενώνονται μεταξύ τους σε δακτύλιο και ο δρομολογητής δε βρίσκεται στο τέλος της αλληλουχίας, αλλά στο μέσον αυτής.



Σχήμα 1.8: Τοπολογία πολλαπλών κόμβων

Τοποθετώντας το δρομολογητή στο μέσο, βελτιώνονται σαφώς τα μειονεκτήματα που καταγράφονται στην τοπολογία αρτηρίας (χρόνος μετάδοσης, κατανάλωση ενέργειας), αλλά και πάλι αυτά είναι άμεσα εξαρτώμενα από τον αριθμό των εν σειρά κόμβων. Επιπλέον τίθεται και σε αυτή την περίπτωση, το ζήτημα των κρίσιμων κόμβων πλησίον του δρομολογητή. Επίσης καθώς το δίκτυο αποτελείται από επιμέρους σειριακά τμήματα, παραμένει το πρόβλημα της ανοχής αξιοπιστίας και εφεδρείας. Η βλάβη σε οποιοδήποτε κόμβο οδηγεί και σε κατάρρευση της συγκεκριμένης «αλυσίδας» του δικτύου.

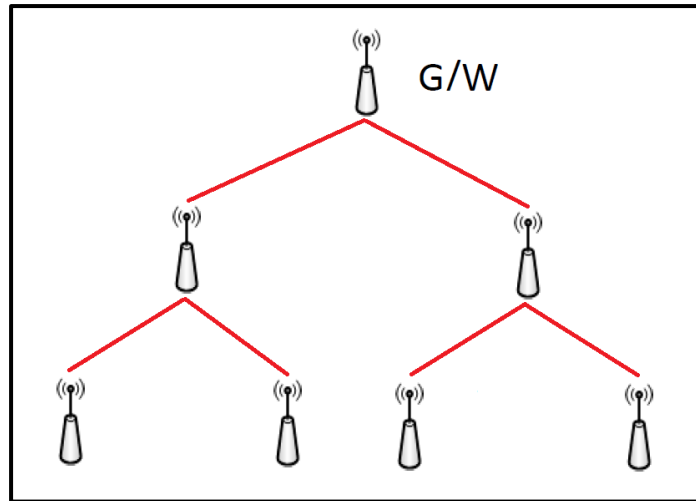
Σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί και η ανάγκη αναδιοργάνωσης του δικτύου αυτής της μορφής, στην περίπτωση βλάβης ενός κόμβου. Το δίκτυο ξεκινά μια χρονοβόρα διαδικασία αναζήτησης των υπόλοιπων διαθέσιμων κόμβων, ώστε να προκύψουν εναλλακτικές διαδρομές. Ανάλογα με το φυσικό φαινόμενο το οποίο παρατηρείται και την έντασή του, αφενός ο χρόνος που θα μεσολαβήσει μέχρι να φτάσει τελικά στο δρομολογητή μπορεί να είναι πολύτιμος, αφετέρου ενδέχεται στο μεσοδιάστημα να έχουν καταστραφεί και άλλοι κόμβοι του δικτύου και ενδεχομένως η πληροφορία να μην φτάσει ποτέ.

Το κόστος μιας τέτοιας τοπολογίας είναι αντίστοιχο μιας τοπολογίας δακτυλίου με ίδιο πλήθος αισθητήρων, που όπως αναφέρθηκε είναι υψηλό καθώς απαιτούνται αισθητήρες με δυνατότητα λήψης και αναπαραγωγής σήματος.

Συνδυάζοντας τα παραπάνω και παρά το γεγονός ότι η δυνατότητα αναδιοργάνωσης είναι λύση ιδιαίτερα χρήσιμη σε άλλες εφαρμογές, δεν ενδείκνυται για παρατήρηση δυναμικών φυσικών φαινομένων.

1.10.4 Τοπολογία Δέντρου - Tree

Στη συγκεκριμένη τοπολογία, η διάταξη των αισθητήρων είναι δεντροειδής και παρατάσσονται σε πολλά επίπεδα. Στο τελευταίο επίπεδο υπάρχει ένας δρομολογητής (ρίζα του δικτύου), ο οποίος λαμβάνει δεδομένα από τους κόμβους του επόμενου επιπέδου. Αυτοί με τη σειρά τους λαμβάνουν πληροφορία από τους κόμβους του χαμηλότερου επιπέδου. Η αλληλουχία συνεχίζεται μέχρι το τελευταίο επίπεδο που αποτελούν τα «φύλλα» του δέντρου (σχήμα 1.9). Το πλεονέκτημά του σε σχέση με τις προηγούμενες τοπολογίες είναι ότι αν καταρρεύσει έναν κόμβο – «φύλλο» το υπόλοιπο δίκτυο μεταδίδει κανονικά τα δεδομένα.



Σχήμα 1.9: Τοπολογία δέντρου

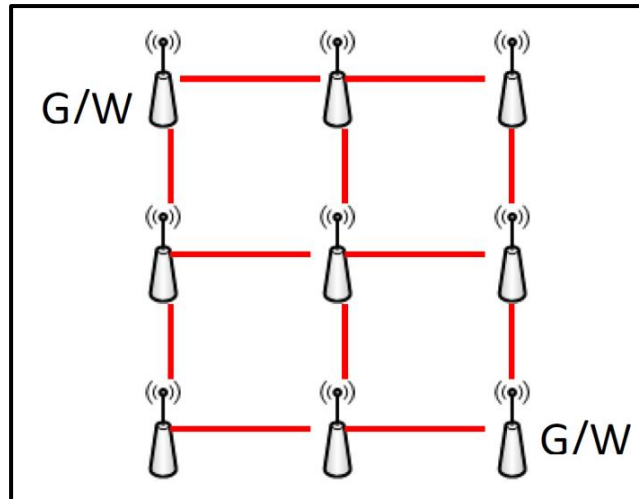
Ο ένας δρομολογητής και τα διαφορετικά επίπεδα από τα οποία πρέπει να μεταδοθεί η πληροφορία έχουν ως αποτέλεσμα και σε αυτή την περίπτωση προβλήματα καθυστερήσεων μετάδοσης, αυξημένης κατανάλωσης ενέργειας και αξιοπιστίας του δικτύου σε περίπτωση κατάρρευσης των κρίσιμων κόμβων.

Η πολυπλοκότητά του θεωρείται αυξημένη καθώς πρέπει να επιλυθούν προβλήματα επικοινωνίας και τοποθέτησης. Όσο περισσότερα επίπεδα και κόμβοι προστίθενται, τόσο δυσχεραίνεται η διαχείριση και συντήρηση του δικτύου. Επιπλέον η ίδια η δομή του δικτύου οδηγεί σε ανομοιόμορφη κάλυψη της επιφάνειας, με αποτέλεσμα να εμφανιστεί αστοχία στην συλλογή της πληροφορίας από μια συγκεκριμένη περιοχή.

Τέλος, το κόστος της τοπολογίας είναι ανάλογο των αισθητήρων που θα χρησιμοποιηθούν και των κλάδων που θα έχει το δέντρο. Ο δρομολογητής είναι μοναδικός, οπότε δεν ανεβαίνει το κόστος. Η ταχύτητα του δικτύου εμφανίζει τα χαρακτηριστικά του multihop routing με τις χρονικές καθυστερήσεις του σήματος από τους κόμβους των «φύλλων» στον δρομολογητή.

1.10.5 Τοπολογία πλέγματος - Mesh

Στην τοπολογία πλέγματος, οι αισθητήρες τοποθετούνται οριζόντια και κάθετα σε ίσες περίπου αποστάσεις, δημιουργώντας ένα πλέγμα. Κάθε αισθητήρας επικοινωνεί με τους γειτονικούς του, οριζοντίως και καθέτως, όχι όμως και με τους διαγώνιους (σχήμα 1.10). Η πολυπλοκότητα αυξάνεται σημαντικά καθώς όλοι οι αισθητήρες στέλνουν πληροφορίες σε όλους τους γειτονικούς, με αποτέλεσμα να αυξάνει δραματικά ο φόρτος δεδομένων και η κατανάλωση ενέργειας.



Σχήμα 1.10: Τοπολογία πλέγματος

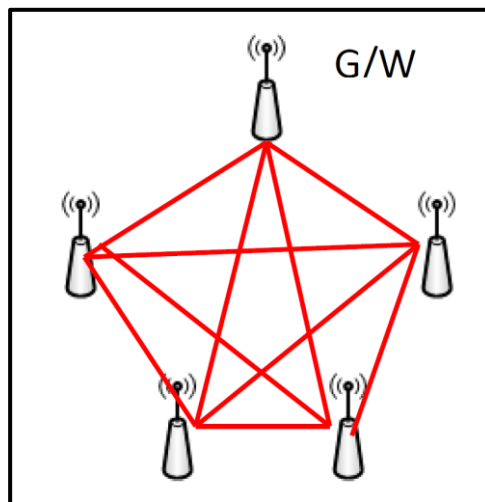
Πρέπει να οριστούν τουλάχιστον δύο δρομολογητές για να μπορεί να ανταποκριθεί το σύστημα. Δεδομένου ότι οι αισθητήρες αποστέλλουν τα δεδομένα προς όλους του γειτονικούς κόμβους δημιουργούνται αρκετοί κρίσιμοι κόμβοι. Στους δρομολογητές θα φτάσουν τα δεδομένα περισσότερες από μια φορές, τα οποία μάλιστα θα είναι ακριβώς τα ίδια. Το γεγονός αυτό μπορεί να εξασφαλίζει ένα βαθμό εφεδρείας (αν χαλάσει ένας δρομολογητής ή κάποιος αισθητήρας το δίκτυο συνεχίζει και λειτουργεί κανονικά), ωστόσο αυξάνεται ο όγκος των δεδομένων που διακινούν οι κόμβοι και οι δρομολογητές του δικτύου. Η κατανάλωση ενέργειας με τόσους κρίσιμους κόμβους είναι απαγορευτική και οδηγεί το δίκτυο σε μικρό χρόνο ζωής. Η ταχύτητα μετάδοσης του σήματος είναι και αυτή συνάρτηση των ενδιάμεσων κόμβων που μεσολαβούν από τον αισθητήρα μέχρι τον δρομολογητή. Γίνεται αντιληπτό ότι σε δίκτυα ευρείας κλίμακας, ο αριθμός των ενδιάμεσων κόμβων είναι αρκετά μεγάλος.

Το κόστος και σε αυτή την περίπτωση είναι ανάλογο του αριθμού των αισθητήρων που θα χρησιμοποιηθούν και της επιφάνειας της περιοχής που πρέπει να καλυφθεί. Λόγω της δημιουργίας πλέγματος, καλύπτεται ολόκληρη η περιοχή, οπότε το πλήθος των απαιτούμενων αισθητήρων είναι σαφώς μεγαλύτερο από αυτό των προηγούμενων τοπολογιών.

Συνοψίζοντας τα σημαντικά σημεία της τοπολογίας θα μπορούσε κανείς να πει πως ενώ παρέχει ικανοποιητική κάλυψη και αξιοπιστία/εφεδρεία, υστερεί σημαντικά στην κατανάλωση ενέργειας και στην πολυπλοκότητα της λειτουργίας για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές.

1.10.6 Τοπολογία πλήρους σύνδεσης – Fully connected

Στην τοπολογία πλέγματος πλήρους σύνδεσης, όλοι οι αισθητήρες επικοινωνούν μεταξύ τους καθώς βρίσκεται ο ένας στην εμβέλεια του άλλου. Με δεδομένο ότι η εμβέλεια των αισθητήρων είναι περιορισμένη, ένα δίκτυο ευρείας κλίμακας οργανώνεται σε κυψέλες (σχήμα 1.11). Η κυψέλη διαθέτει έναν δρομολογητή, ενώ η προσθήκη εφεδρικού επηρεάζει τόσο την τοπολογία, όσο και το κόστος, ενώ η τοποθέτησή του ενδέχεται να μην του επιτρέπει να συνδέεται με όλους τους κόμβους.



Σχήμα 1.11: Τοπολογία fully connected

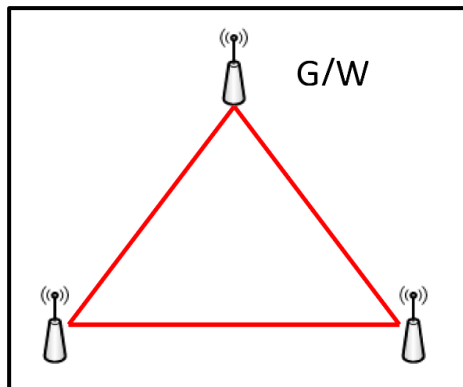
Στη συγκεκριμένη τοπολογία αίρεται το πρόβλημα των κρίσιμων κόμβων και της εφεδρείας του δικτύου, όχι όμως και αυτά της υψηλής κατανάλωσης ενέργειας και υψηλού φόρτου δεδομένων, καθώς όλοι οι κόμβοι επικοινωνούν με όλους.

Το κόστος ανάπτυξης ενός τέτοιου δικτύου είναι ανάλογο του πλήθους των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται. Η ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων είναι ικανοποιητική δεδομένου ότι όλοι οι κόμβοι στέλνουν δεδομένα χωρίς μεσάζοντες κατευθείαν στον δρομολογητή. Πραγματοποιείται ένα σημαντικό βήμα στο θέμα ταχύτητας και εφεδρείας, αλλά δεν είναι ολοκληρωμένο καθώς σημαντικό μειονέκτημα της τοπολογίας αποτελεί το φορτίο σε όλους τους αισθητήρες και η άσκοπη κατανάλωση ενέργειας.

1.10.6.1 Τοπολογία τριγώνου

Η συγκεκριμένη τοπολογία αποτελεί υποκατηγορία αυτής του πλέγματος πλήρους σύνδεσης. Εξετάζεται μόνη της καθώς μπορεί να υποδείξει κάποια

σημαντικά προβλήματα που μπορούν να εντοπιστούν και σε άλλες πιο αξιόπιστες τοπολογίες που έχουν ως βάση τις τριγωνικές (σχήμα 1.12).



Σχήμα 1.12: Τοπολογία τριγώνου

Το κόστος υλοποίησης της εξαρτάται από το πλήθος των τριγώνων που θα χρησιμοποιηθούν και από το πλήθος των δρομολογητών. Αν για παράδειγμα χρησιμοποιηθεί ο ίδιος δρομολογητής για περισσότερα του ενός τρίγωνα που έχουν όλα κοινή κορυφή αυτήν που βρίσκεται ο δρομολογητής, τότε το κόστος μετριάζεται.

Σχετικά με την κατανάλωση πόρων, το σύστημα εμφανίζει χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με άλλες τοπολογίες, δεδομένου ότι δεν υπάρχουν κρίσιμοι κόμβοι (κάθε κόμβος επικοινωνεί απ' ευθείας με το δρομολογητή). Η ίδια η δομή της τοπολογίας δίνει δυνατότητα να χρησιμοποιούνται αισθητήρες οι οποίοι μόνο εκπέμπουν χωρίς να χρειάζεται να λάβουν και να δρομολογήσουν δεδομένα άλλων, με αποτέλεσμα να μπορούν να επικοινωνήσουν μόνο με τον δρομολογητή. Αυτός ο περιορισμός συνεπάγεται την ακόμη πιο χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Συνέπεια της έλλειψης κρίσιμων κόμβων και του φόρτου αυτών αποτελεί και η ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων των αισθητήρων αφού αποστέλλουν απευθείας τα δεδομένα στην πύλη.

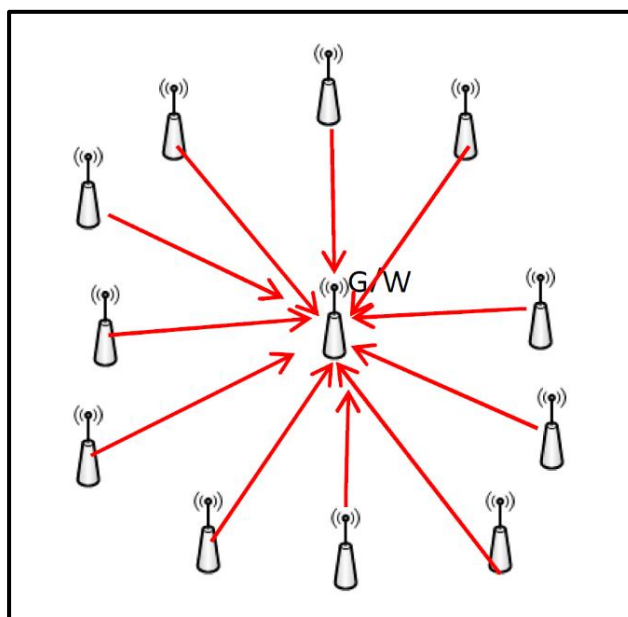
Αν αστοχήσει ένας αισθητήρας χάνεται μόνο αυτός και όχι ολόκληρο τμήμα του δικτύου. Έτσι η τοπολογία τριγώνου παρουσιάζει σαφή πλεονεκτήματα σε θέματα εφεδρείας και αξιοπιστίας. Η πολυπλοκότητα της λειτουργίας του δικτύου είναι ιδιαίτερα χαμηλή. Τίθεται μόνο θέμα πυκνότητας δικτύου, δηλαδή πλήθους στοιχειωδών ψηφιδών δικτύου οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη μιας περιοχής.

Η τοπολογία αποτελεί τη βάση για ένα ολοκληρωμένο δίκτυο με εκτεταμένη ανάπτυξη τριγωνικών δομών. Με άλλα λόγια, η τοπολογία τριγώνου αποτελεί την στοιχειώδη ψηφίδα ανάπτυξης δικτύων γεωαισθητήρων για εφαρμογές ευρείας κλίμακας.

1.10.7 Τοπολογία αστέρα - κυψέλης

Στην τοπολογία αυτή ο δρομολογητής τοποθετείται στο κέντρο των αισθητήρων, οι οποίοι απλώνονται γύρω από αυτές σε ίση περίπου ακτίνα. Στην ιδανική περίπτωση δημιουργείται ένα κανονικό εξάγωνο, με τον δρομολογητή στο κέντρο αυτού (σχήμα 1.13).

Ουσιαστικά η συγκεκριμένη δομή αποτελείται από 6 μοναδιαίες τοπολογίες τριγώνου με ίσες πλευρές, όπως εξετάστηκε παραπάνω. Στην πράξη, σπάνια τα τρίγωνα είναι ισόπλευρα, ενώ συνήθως γύρω από τον δρομολογητή τοποθετούνται περισσότεροι από 6 αισθητήρες, αναλόγως της εμβέλειάς τους και την επιφάνεια κάλυψης.



Σχήμα 1.13: Τοπολογία αστέρα - κυψέλης

Το κόστος αυτής της τοπολογίας είναι ανάλογο των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται. Ο δρομολογητής στην εν λόγω διάταξη είναι ένας. Η κατανάλωση ενέργειας είναι περιορισμένη καθώς ο κάθε αισθητήρας επικοινωνεί κατευθείαν και μόνο με τον δρομολογητή. Έτσι η ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων των αισθητήρων είναι ίση με την ταχύτητα μετάδοσης του σήματος από τον αισθητήρα στον δρομολογητή.

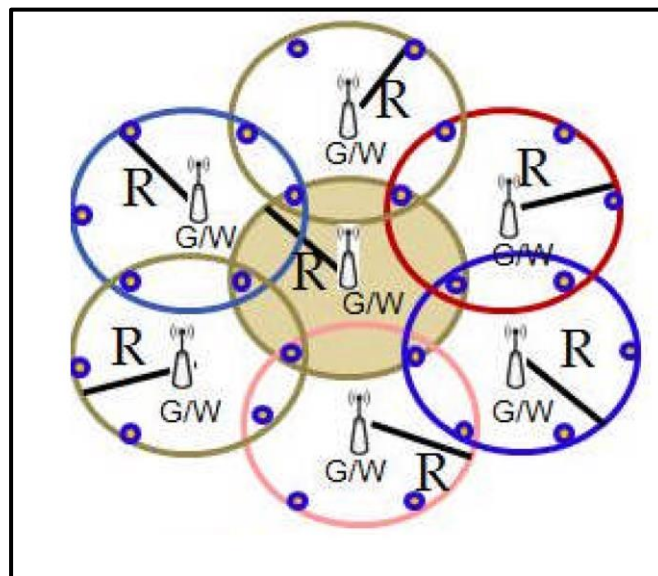
Κατά συνέπεια εφαρμόζοντας τη συγκεκριμένη τοπολογία σε εφαρμογές ευρείας κλίμακας, αποφεύγεται το μειονέκτημα των κρίσιμων κόμβων και του φόρτου τους και αυξάνεται η αξιοπιστία του συστήματος δεδομένου ότι τα σημεία κατάρρευσης του δικτύου πηγάζουν μόνο από την βλάβη του δρομολογητή και κανενός άλλου κόμβου. Αν υποστεί βλάβη κάποιος αισθητήρας θα χαθεί η πληροφορία μόνο για την περιοχή την οποία αυτός καλύπτει. Η πολυπλοκότητα της λειτουργίας της τοπολογίας είναι χαμηλή ενώ

η χρησιμότητα και η αποτελεσματικότητα υψηλή και αρκετά ικανοποιητική για εφαρμογές ευρείας κλίμακας.

1.10.7.1 Τοπολογία αστέρα – κυψέλης με επικαλύψεις

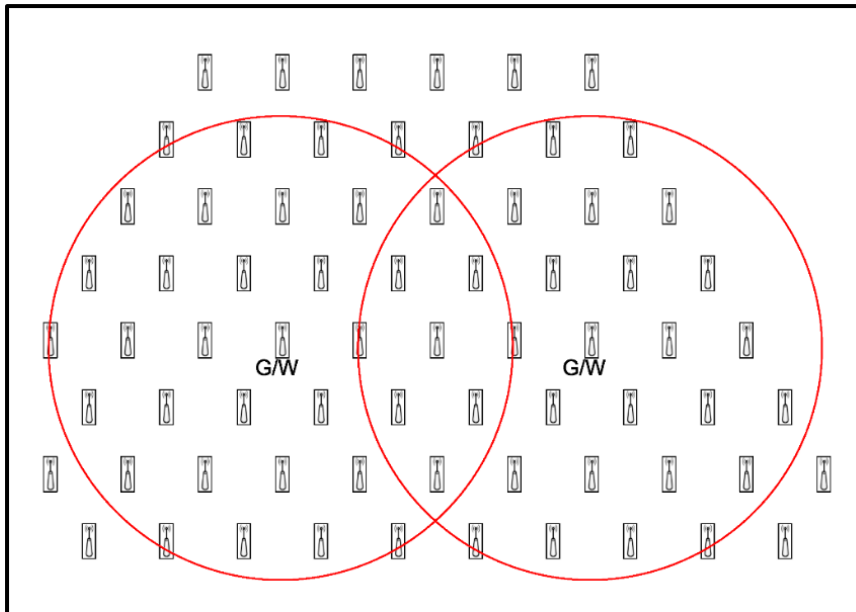
Όπως έγινε ήδη κατανοητό, η εν λόγω τοπολογία κρίνεται ιδιαίτερα ικανοποιητική στην κάλυψη φαινομένων σε εκτεταμένες περιοχές. Μικρό μειονέκτημα το οποίο εντοπίζεται είναι η περίπτωση βλάβης κάποιου δρομολογητή. Παρόλ' αυτά η αξιοπιστία και η εφεδρεία μπορούν να βελτιωθούν επιπλέον με την προσθήκη περισσότερων δρομολογητών, οι οποίοι δημιουργούν αλληλοεπικαλυπτόμενες κυψέλες. Κάθε αισθητήρας βρίσκεται στην εμβέλεια περισσότερων του ενός δρομολογητών. Έτσι αν κάποιος εξ αυτών αστοχήσει, τα δεδομένα του αισθητήρα θα μεταδοθούν από κάποιον γειτονικό δρομολογητή. Ιδανικά γύρω από κάθε κυψέλη – εξάγωνο, τοποθετούνται 6 όμοιες με την αρχική κυψέλες.

Στο σχήμα 1.14, χάριν απλούστευσης, ο κάθε αισθητήρας έχει εμβέλεια ακτίνας R, τόσο σε ότι αφορά την ανίχνευση του φαινομένου, όσο και στην απόσταση μετάδοσης της πληροφορίας.



Σχήμα 1.14: Τοπολογία κυψέλης με επικαλύψεις (Κολεγά, 2014)

Στην πραγματικότητα η απόσταση μετάδοσης είναι πολύ μεγαλύτερη από την απόσταση ανίχνευσης, έτσι οι δρομολογητές σε ένα ασύρματο δίκτυο γεωαισθητήρων (GSN) τοποθετούνται σε πολύ αραιότερες αποστάσεις από τους αισθητήρες (σχήμα 1.15).



Σχήμα 1.15: Κατανομή κόμβων ενός GSN

Ο μόνος τρόπος να μην καταστεί δυνατή η μετάδοση της πληροφορίας είναι να αστοχήσουν όλοι οι δρομολογητές στην εμβέλεια των οποίων βρίσκεται ο αισθητήρας. Η εν λόγω τοπολογία μπορεί να εφαρμοστεί με τρόπο που να παρέχει αρκετά υψηλά επίπεδα εφεδρείας και αξιοπιστίας.

Όσο αφορά την ταχύτητα και την κατανάλωση ισχύουν κι εδώ τα της τοπολογίας αστέρα. Η τοπολογία δεν εμφανίζει κρίσιμους κόμβους, η ταχύτητα στην μετάδοση του σήματος είναι μεγάλη και επιτυγχάνεται η ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας, εφόσον οι αισθητήρες επικοινωνούν κατευθείαν και μόνο με τον δρομολογητή.

Η πολυπλοκότητα του τρόπου λειτουργίας του συστήματος θεωρείται μέτρια. Η απλή λειτουργία μιας κυψέλης επαναλαμβάνεται πολλές φορές. Αν λειτουργούν όλοι οι δρομολογητές, τότε τα δεδομένα θα φτάσουν στο κέντρο ελέγχου από δύο ή περισσότερους δρομολογητές. Η χρηστικότητα και η αποτελεσματικότητα της τοπολογίας παραμένει υψηλή.

Σε επόμενο κεφάλαιο αναλύεται γεωμετρικά η τοπολογία πλέγματος κυψελών με επικαλύψεις. Αναπτύσσεται το μαθηματικό μοντέλο κάλυψης μιας ευρείας περιοχής στην οποία οι πιθανές θέσεις τοποθέτησης αισθητήρων δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες, ώστε να δημιουργούν ισόπλευρα τρίγωνα. Τέλος η λύση ελέγχεται για το κατά πόσον προσομοιάζει καλύτερα την ιδανική τοποθέτηση σε ισαπέχουσες θέσεις.

1.10.8 Πολυκριτηριακή αξιολόγηση

Σκοπός της καταγραφής των εναλλακτικών τοπολογιών σύνδεσης ασύρματων δικτύων είναι η επιλογή του καταλληλότερου και πιο αξιόπιστου, για τα δεδομένα και τις συνθήκες του προς επίλυση προβλήματος.

Για την αξιολόγηση κάθε τοπολογίας και επιλογή της καλύτερης δυνατής, εφαρμόστηκε η μέθοδος της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Η πολυκριτηριακή ανάλυση μπορεί να ορισθεί ως μία συστηματική και μαθηματικά τυποποιημένη προσπάθεια επίλυσης προβλημάτων που προκύπτουν από αντικρουόμενους στόχους/αποτελέσματα. Η ικανοποίηση των στόχων αυτών δεν μπορεί να είναι πλήρης. Οι διαθέσιμες επιλογές σε ένα τέτοιο πρόβλημα παρουσιάζουν άριστη επίδοση μόνο ως προς έναν ή περισσότερους στόχους, αλλά ποτέ ως προς όλους, γιατί τότε δε θα υπήρχε πρόβλημα απόφασης. Η επιλογή που θα ικανοποιούσε μια τέτοια συνθήκη θα ήταν η άριστη.

Είναι αναγκαίος λοιπόν ένας συμβιβασμός μεταξύ των αλληλοσυγκρουόμενων στόχων. Πρέπει δηλαδή για τη λήψη της βέλτιστης απόφασης να επιλεγούν ο στόχος ή οι στόχοι, οι οποίοι είναι επιθυμητό να μεγιστοποιηθούν, καθώς και οι αντισταθμιστικές απώλειες που είναι δυνατόν να θυσιαστούν ως προς τους υπόλοιπους στόχους.

Η έννοια του συμβιβασμού και κατ' επέκταση της συμβιβαστικής λύσης – σε αντιδιαστολή προς την άριστη λύση – δηλώνει το χαρακτήρα των αποφάσεων – λύσεων, που αναζητούνται στα πολυκριτηριακά προβλήματα. Οι λύσεις αυτές είναι άριστες μόνο κατά την άποψη του ατόμου που αποφασίζει για την επιλογή στο πρόβλημα με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. (ΕΜΠ - Σχολή Χημικών Μηχανικών, 2005)

Έτσι ελέγχεται η υλοποίηση κάποιων συγκεκριμένων και θεμελιωδών κριτηρίων. Τα κριτήρια αυτά τίθενται στην αρχή της διαδικασίας, και ανάλογα με την εφαρμογή τους, οι τοπολογίες αποκτούν ορισμένα βάρη που αναφέρονται ως βαθμολογίες.

Στο τέλος της διαδικασίας η τοπολογία με την μεγαλύτερη βαθμολογία θα αποτελέσει την προτεινόμενη λύση.

Τα βασικά κριτήρια ως προς τα οποία αξιολογούνται οι τοπολογίες είναι:


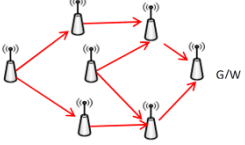
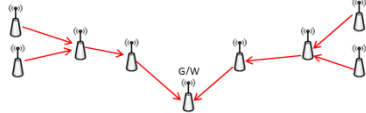
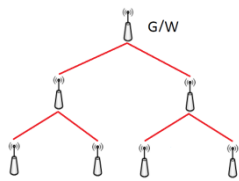
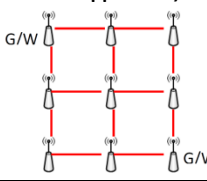
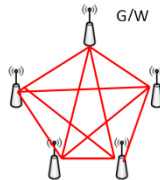
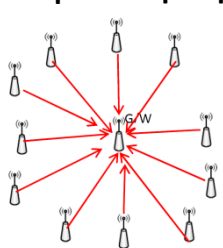
- Η ευκολία εγκατάστασης
- Η προσαρμογή σε ευρείας κλίμακας εφαρμογές
- Η ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων
- Η αξιοπιστία/εφεδρεία του δικτύου
- Το κόστος υλοποίησης

- Η κατανάλωση ενέργειας

Ως προς τη βαθμολογία επιλέχθηκε η κλίμακα 1-5, με το 1 να αντιστοιχεί στον μικρότερο βαθμό ικανοποίησης του κριτηρίου και το 5 στον μεγαλύτερο. Η βαθμολόγηση πραγματοποιήθηκε με βάση τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε τοπολογίας, όπως αυτά περιγράφησαν παραπάνω.

Όπως προκύπτει από τον παρακάτω πίνακα (πίνακας 1.2), αλλά και από την ανάλυση που προηγήθηκε η πλέον ενδεδειγμένη τοπολογία για τις ανάγκες της εφαρμογής είναι η τοπολογία αστέρα – κυψέλης.

Με βάση αυτή λοιπόν, θα δομηθεί η προτεινόμενη μεθοδολογία βέλτιστης χωροθέτησης του δικτύου αρχικά, αλλά και η αξιολόγησή του, εν συνεχεία.

Τοπολογία	Κριτήρια						Σύνολο
	Ευκολία εγκατάστασης	Προσαρμογή σε μεγάλα δίκτυα	Ταχύτητα αποστολής δεδομένων	Αξιοπιστία/Εφεδρεία	Κόστος υλοποίησης	Κατανάλωση ενέργειας	
Αρτηρίας 	5	1	1	1	1	2	11
Δακτυλίου 	3	2	1	2	1	2	11
Πολλαπλών κόμβων 	3	2	2	2	1	2	12
Δέντρου 	2	2	3	3	2	2	14
Πλέγματος 	2	2	2	3	3	1	13
Πλήρους Σύνδεσης 	3	3	3	2	3	2	16
Αστέρα – κυψέλης 	4	4	5	4	4	4	25

Πίνακας 1.2: Αξιολόγηση προτεινόμενων τοπολογιών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Μεθοδολογία χωροθέτησης ασύρματων δικτύων γεωαισθητήρων

2.1 Ορισμός του προβλήματος

Η βέλτιστη εγκατάσταση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων ή γεωαισθητήρων (WSN ή GSN), είναι πολυδιάστατο πρόβλημα με δύο κύριες συνιστώσες: τη βέλτιστη δικτυακή κάλυψη και τη βέλτιστη χωρική κάλυψη. Όπως προέκυψε από την ανάλυση που προηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η βέλτιστη τοπολογία για τη δικτυακή κάλυψη του δικτύου είναι η τοπολογία κυψέλης, με τους αισθητήρες να είναι ιδανικά διατεταγμένοι στο κέντρο κανονικών εξαγώνων.

Αντίστοιχα, η διάταξη κόμβων διατεταγμένων σε κανάβο αποτελούμενο από ισόπλευρα, εξασφαλίζει και την πλήρη χωρική κάλυψη με τον ελάχιστο αριθμό αισθητήρων.

Η τοποθέτηση των κόμβων ενός WSN, ενδεχομένως και να είναι απλή ως διαδικασία, όταν πρόκειται για περιορισμένο πεδίο παρατήρησης. Για εφαρμογές μικρής κλίμακας, όπου ο αριθμός των αισθητήρων είναι επίσης μικρός και οι θέσεις τοποθέτησης αρκετά σαφείς και συγκεκριμένες, είναι εφικτή και η τοποθέτησή τους σε διάταξη ιδανικής γεωμετρίας.

Όταν όμως η εφαρμογή αναπτύσσεται σε ευρεία κλίμακα και η περιοχή μελέτης είναι πολύ μεγαλύτερη, ο αριθμός των απαιτούμενων αισθητήρων αυξάνεται σημαντικά και μπορεί να ξεπεράσει τις μερικές χιλιάδες. Αντίστοιχα ακόμα και σε εφαρμογές περιορισμένου πεδίου, μπορεί να απαιτείται μεγάλος αριθμός αισθητήρων για την πλήρη παρατήρηση του φαινομένου. Επακόλουθο είναι να αυξάνεται κατακόρυφα και το κόστος εγκατάστασης.

Επίσης οι θέσεις εγκατάστασης δεν είναι συγκεκριμένες και σαφείς. Η τοποθέτησή τους υπό διάταξη ιδανικής γεωμετρίας (ισόπλευρα τρίγωνα), είναι πρακτικά αδύνατη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εφαρμογή για ανίχνευση καπνού σε ένα δάσος. Οι πιθανές θέσεις εγκατάστασης των δεκτών, μπορεί να είναι αποκλειστικά πάνω σε κάποια από τα δέντρα, που όμως δεν βρίσκονται απαραίτητα σε διάταξη κανονικού τριγωνικού κανάβου.

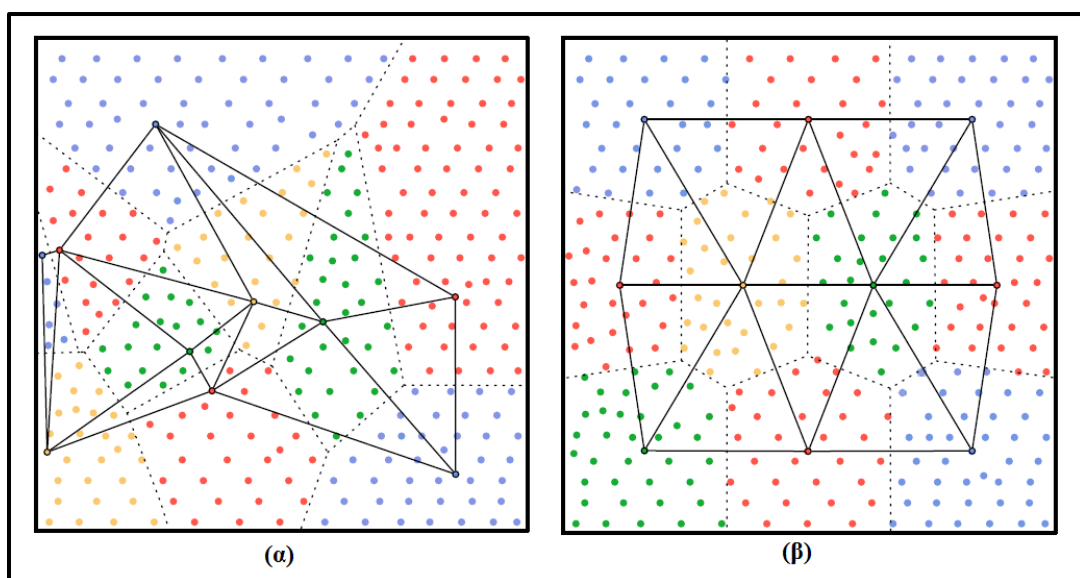
Έτσι λοιπόν, αναζητούνται οι καλύτερες δυνατές θέσεις εγκατάστασης, από ένα πλήθος υποψηφίων θέσεων. (Iliodromitis, Pantazis, & Vescoukis, 2017).

2.2 Υφιστάμενες λύσεις στο πρόβλημα της χωροθέτησης

Η χωροθέτηση ασύρματων δικτύων αισθητήρων και γεωαισθητήρων καθώς και η βελτιστοποίηση των δικτύων, έχουν απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα. Η χωροθέτηση και η βελτιστοποίηση αυτής, αφορούν τόσο στην γεωγραφική κάλυψη, όσο και στη δικτυακή κάλυψη της περιοχής μελέτης. Αμφότερα είναι εξίσου σημαντικά καθώς ελάχιστο νόημα έχει η πλήρης γεωγραφική κάλυψη μιας περιοχής, αν είναι αδύνατη η επίτευξη επικοινωνίας μεταξύ των αισθητήρων. Αντίστροφα, ακόμα και αν λυθούν τα προβλήματα επικοινωνίας και σύνδεσης του δικτύου, αν δεν πληρείται η γεωγραφική κάλυψη της περιοχής, το δίκτυο δεν επιτυγχάνει το σκοπό του.

Αλγόριθμους βελτιστοποίησης δικτυακής επικοινωνίας μπορεί να βρει κανείς σε πολλές εργασίες και σε πολλές παραλλαγές. Παρόλ' αυτά δε μελετήθηκαν για την παρούσα εργασία. Χαρακτηριστική εργασία βελτιστοποίησης επικοινωνίας για ευρείας κλίμακας ασύρματα δίκτυα αισθητήρων γίνεται στην εργασία "Optimal deployment of large wireless sensor networks" (Toumpis & Tassioulas, 2006).

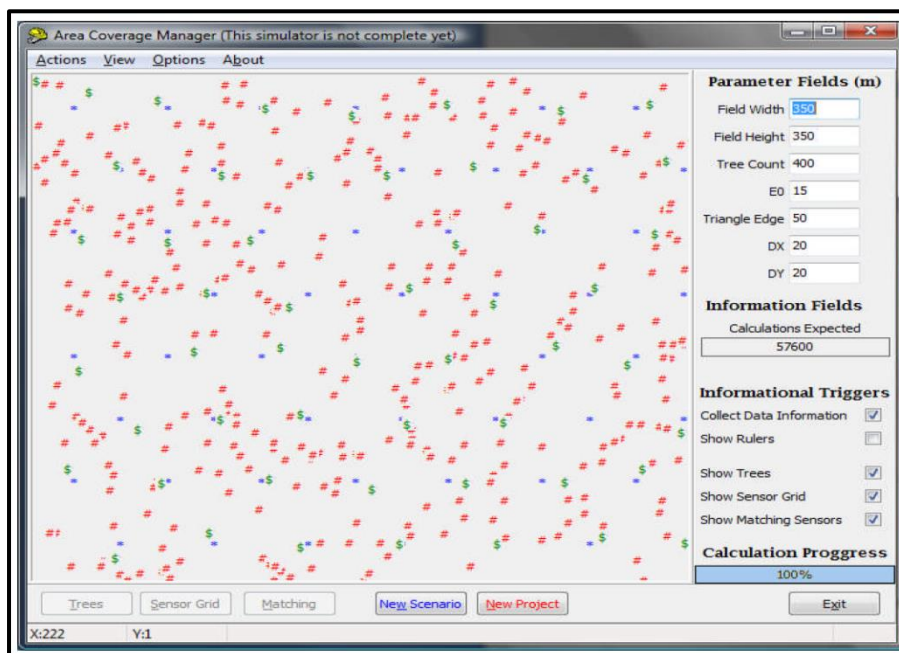
Η κεντροειδής διαμέριση Voronoi (CVT) προτείνεται ως μέθοδος βελτιστοποίησης της επικοινωνίας από τους (Zhou, Jin, & Wu, 2013). Παρόλ' αυτά στη συγκεκριμένη εργασία θεωρείται ότι τα σημεία εγκατάστασης βρίσκονται τοποθετημένα σε θέσεις που επιτυγχάνουν ιδανική γεωμετρία και όχι σε τυχαίες θέσεις (σχήμα 2.1). Η κεντροειδής διαμέριση Voronoi, καθώς και τα πλεονεκτήματά της μεθόδου, αναπτύσσονται εκτεταμένα σε επόμενη παράγραφο, καθώς χρησιμοποιείται και στην παρούσα διδακτορική διατριβή για την επίλυση του προβλήματος της χωροθέτησης.



Σχήμα 2.1: Χωροθέτηση με βάση πολύγωνα Voronoi (α) και ιδανικές θέσεις που προκύπτουν από δημιουργία CVT (β)

Αντίστοιχα σε ότι αφορά τη γεωγραφική κάλυψη, μπορεί να βρει κανείς πλήθος αλγόριθμων σε πολλές παραλλαγές. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι αλγόριθμοι που έχουν αναπτυχθεί είναι ευρετικοί. Δηλαδή, δίνουν μια λύση από ένα σύνολο πιθανών λύσεων, σε μικρό χρονικό διάστημα, αλλά δεν εξασφαλίζουν ότι είναι η καλύτερη δυνατή. Παραμένει λοιπόν το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης. Επιπλέον στις περισσότερες εργασίες, δεν υπάρχει η απαίτηση για δεσμευμένες θέσεις εγκατάστασης των αισθητήρων, αλλά η τοποθέτηση γίνεται σε τυχαίες θέσεις.

Στην ελληνική βιβλιογραφία, προτείνεται ευρετικός αλγόριθμος σχεδιασμού και υλοποίησης ενός δικτύου αισθητήρων ευρείας κλίμακας και υψηλής χωρικής πυκνότητας, σε σχέση με το απόλυτο θεωρητικό σενάριο, το ιδανικό πλέγμα αισθητήρων (Κολεγά, 2014), (Kolega & Vescoukis, 2013). Στην περίπτωση αυτή, υπάρχει η απαίτηση οι θέσεις εγκατάστασης των αισθητήρων να είναι σε συγκεκριμένα – δεσμευμένα σημεία. Δίνονται οι πιθανές θέσεις τοποθέτησης, που είναι οι συντεταγμένες των δέντρων, στην περίπτωση ενός δικτύου ανίχνευσης πυρκαγιάς. (εικόνα 2.1)



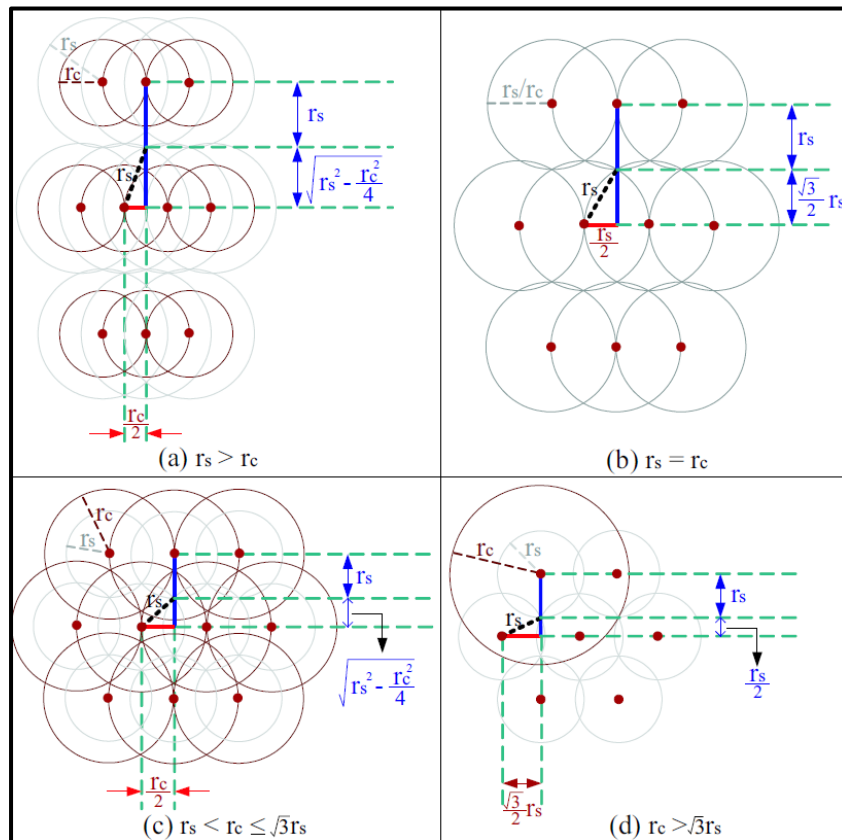
Εικόνα 2.1: Λογισμικό χωροθέτησης αισθητήρων

Αρχικά η περιοχή υποδιαιρείται σε μικρότερες με τη χρήση του αλγορίθμου Quad-trees και ομαδοποιείται με τον αλγόριθμο k-means. Ορίζεται η πλευρά α του ιδανικού πλέγματος καθώς και μια τιμή E_0 . Ο αλγόριθμος αναζητά τα σημεία που βρίσκονται εντός απόστασης E_0 από το ιδανικό πλέγμα και τα δεσμεύει ως θέσεις τοποθέτησης. Προφανώς, όσο αυξάνεται το E_0 , τόσο περισσότερα σημεία δεσμεύονται, αλλά τόσο χειροτερεύει η ιδανική γεωμετρία.

Η μετατόπιση του ιδανικού πλέγματος τριγώνων, γίνεται εισάγοντας κάθε φορά τις τιμές μετατόπισης σε σχέση με την αρχική λύση. Έτσι μετά από δοκιμές προκύπτει η λύση με τα περισσότερα δεσμευμένα σημεία, χωρίς να εξασφαλίζεται, παρόλ' αυτά, ότι κάποιος άλλος συνδυασμός μετατόπισης ή στροφής του αρχικού κανάβου δεν έχει ως αποτέλεσμα κάποια περισσότερο αποδοτική λύση.

Μία λύση η οποία επιτυγχάνει πλήρη γεωγραφική κάλυψη και ταυτόχρονη εξασφάλιση επικοινωνίας για μεγάλες περιοχές προτείνουν οι (Wang, Hu, & Tseng, 2005). Συγκρίνεται η ακτίνα ανίχνευσης (sensing range) r_s και η ακτίνα επικοινωνίας (connectivity range) r_c του αισθητήρα και διακρίνονται δύο περιπτώσεις: (σχήμα 2.2)

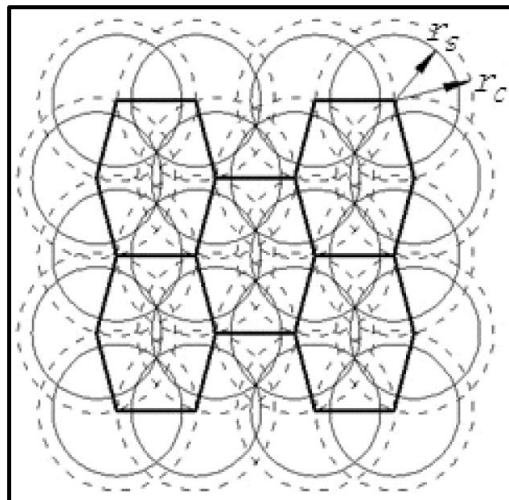
- Αν $r_c \leq \sqrt{3} \cdot r_s$, προτείνεται οι αισθητήρες να τοποθετούνται σε σειρές. Η απόσταση μεταξύ των αισθητήρων της ίδια σειράς είναι r_c , ενώ οι σειρές απέχουν μεταξύ τους $r_s + \sqrt{r_s^2 - \frac{r_c^2}{4}}$, έχοντας και μια μετατόπιση κατά $\frac{r_c}{2}$.
- $r_c > \sqrt{3} \cdot r_s$, προτείνεται η τοποθέτηση να γίνεται σε κανονικό εξαγωνικό κανάβο, λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρει η συγκεκριμένη διάταξη.



Σχήμα 2.2: Χωροθέτηση αισθητήρων με βάση τις εμβέλειες ανίχνευσης και επικοινωνίας

Και στις δύο περιπτώσεις η τοποθέτηση βασίζεται στην επίτευξη ιδανικής γεωμετρίας, αλλά δε λαμβάνονται καθόλου υπόψη οι ιδιαιτερότητες της περιοχής μελέτης. Όπως έχει αναφερθεί η ιδανική γεωμετρία επιτυγχάνει μεν πλήρη κάλυψη, αλλά αυξάνει σημαντικά το κόστος, ενώ δεν είναι πάντα εφικτό να επιτευχθεί.

Αντίστοιχη μεθοδολογία τοποθέτησης που βασίζεται στις ακτίνες ανίχνευσης και επικοινωνίας των αισθητήρων, δημιουργώντας εξάγωνα από ισοσκελή τρίγωνα (σχήμα 2.3), προτείνεται στην εργασία “Study on Optimal Regular Deployment Patterns of Wireless Sensor Network” (Zhang & Zhou, 2012).

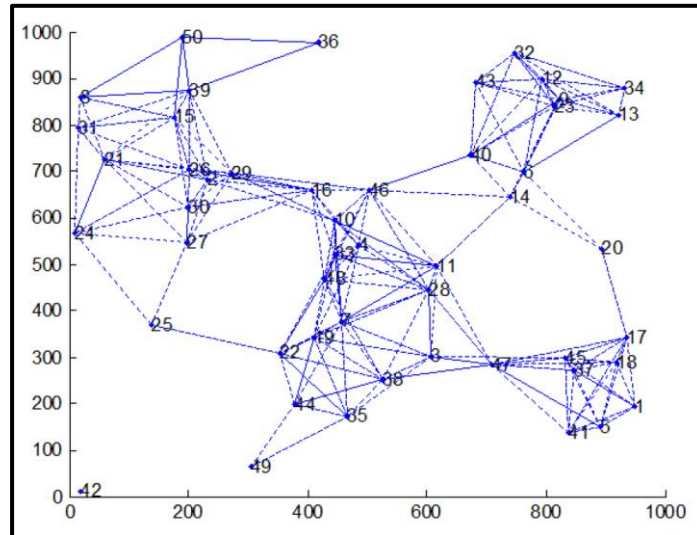


Σχήμα 2.3: Χωροθέτηση αισθητήρων με εξάγωνα αποτελούμενα από ισοσκελή τρίγωνα

Μια προσέγγιση χωροθέτησης με χρήση πολυγώνων Voronoi (VD) γίνεται από τους Vieira, Vieira, et al. Όπως και στην περίπτωση που μελετάται στην παρούσα διδακτορική διατριβή, λαμβάνονται ως δεδομένα η περιοχή μελέτης και οι υποψήφιες θέσεις τοποθέτησης. Αρχικά θεωρείται ότι τοποθετούνται αισθητήρες σε όλα τα σημεία και κατασκευάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα Voronoi. Στη συνέχεια το σημείο με το μικρότερο πολύγωνο αφαιρείται, καθώς η περιοχή του μπορεί να επιβλέπεται από τους όμορους αισθητήρες. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται από την αρχή μέχρι όλα τα πολύγωνα Voronoi να είναι μεγαλύτερα από κάποιο δοθέν κατώφλι (όριο). Για μεγάλο αριθμό αισθητήρων ο αλγόριθμός γίνεται εξαιρετικά αργός. (Vieira, Vieira, & et al., 2003)

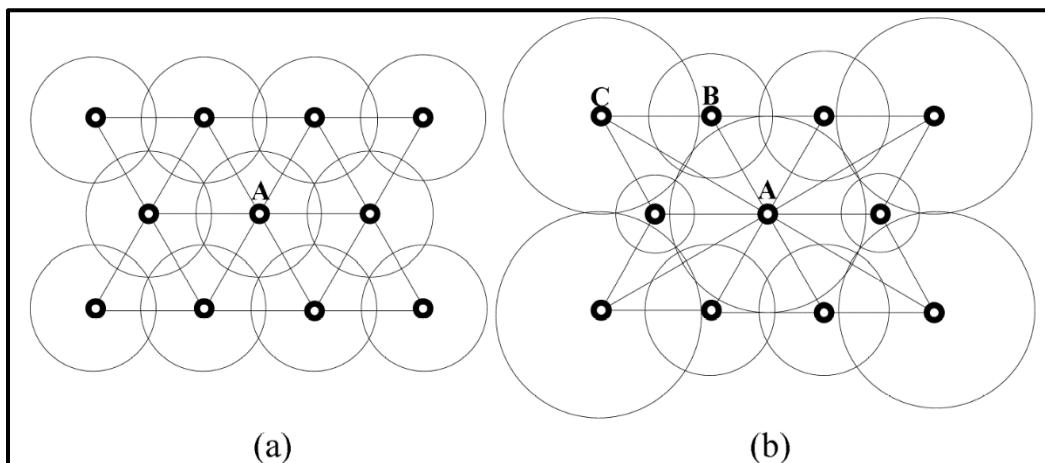
Ο τριγωνισμός Delaunay χρησιμοποιείται και αυτός ως βάση σε αλγορίθμους χωροθέτησης δικτύων αισθητήρων (σχήμα 2.4). Οι ιδιότητες του τριγωνισμού Delaunay, που θα αναλυθούν στην συνέχεια, είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στις περιπτώσεις κάλυψης ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Τα πλεονεκτήματα του σε σχέση με τον τετραγωνικό κάναβο καταγράφονται στην

εργασία: “An Efficient Coverage Scheme for Wireless Sensor Network” (Dagar & Saroha, 2013). Το βασικότερο μειονέκτημα του τετραγωνικού κανάβου είναι ότι παρουσιάζει μεγαλύτερες επικαλύψεις με αποτέλεσμα να απαιτούνται περισσότεροι κόμβοι για την πλήρη κάλυψη.



Σχήμα 2.4: Χωροθέτηση αισθητήρων με τριγωνισμό Delaunay

Χαρακτηριστική είναι η εργασία: “Energy Efficient Coverage with Variable Sensing Radii in Wireless Sensor Networks” (Wang & Medidi, 2007). Με την προτεινόμενη μεθοδολογία επιτυγχάνουν την ελαχιστοποίηση στην κατανάλωση ενέργειας κατά την επικοινωνία των αισθητήρων και πλήρη κάλυψη της περιοχής (σχήμα 2.5). Και σε αυτή την περίπτωση όμως λαμβάνεται ιδανική γεωμετρία χωροθέτησης.

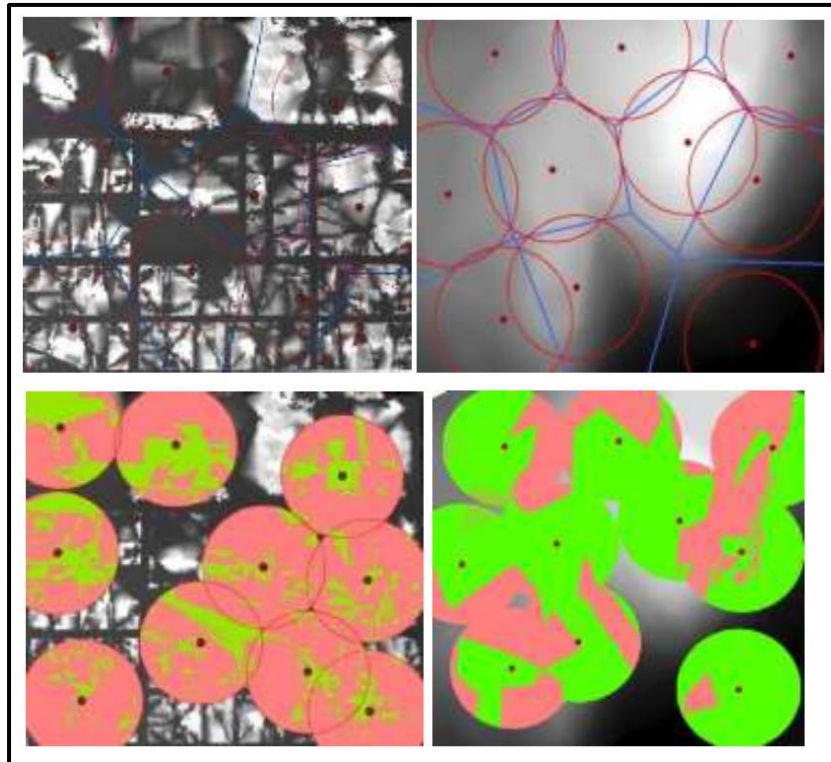


Σχήμα 2.5: Χωροθέτηση αισθητήρων με ισόπλευρα και ισοσκελή τρίγωνα

Οι (Vu & Li, 2009) βελτιώνουν την προηγούμενη μεθοδολογία σε ότι αφορά την κατανομή των αισθητήρων στα όρια της περιοχής μελέτης (boundary effect), αλλά και αυτοί επικεντρώνονται κυρίως στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας.

Μια διαφορετική πρόταση χωροθέτησης με τριγωνισμό Delaunay προτείνεται από τους (Wu, Lee, & Chung, 2006). Η ιδέα της σταδιακής απαλοιφής κόμβων μέσω του τριγωνισμού Delaunay με περιορισμούς (CDT) χρησιμοποιείται και από τον (Devaraj, 2015).

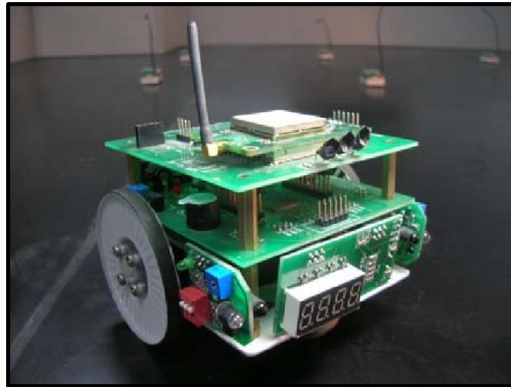
Μια ακόμα ενδιαφέρουσα μελέτη στην οποία συγκεντρώνονται και καταγράφονται διαφορετικές προσεγγίσεις χωροθέτησης δικτύων γεωαισθητήρων και ανίχνευσης κενών στην κάλυψη της περιοχής μελέτης είναι η εργασία των (Argany, Mostafavi, & Karimipour, 2011). Επικεντρώνονται σε αυτές που προσεγγίζουν τη λύση με τριγωνισμό Delaunay και πολύγωνα Voronoi, ενώ προτείνουν και μια λύση με πολύγωνα Voronoi η οποία βασίζεται στην αξιοποίηση της χωρικής πληροφορίας (φυσικά εμπόδια, διαθέσιμο DTM κ.α.) (εικόνα 2.2)



Εικόνα 2.2: Χωροθέτηση αξιοποιώντας το DTM της περιοχής μελέτης

Τέλος έχουν προταθεί και λύσεις, όπου οι αισθητήρες είναι κινητοί (Song, Zhou, Ding, & Song, 2008). Στην περίπτωση αυτή οι αισθητήρες μετακινούνται αυτόνομα προς τις θέσεις εγκατάστασης (εικόνα 2.3). Η περιοχή χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα με τετραγωνικό κάναβο. Σε κάθε τμήμα τοποθετείται τουλάχιστον ένας κινητός αισθητήρας. Το μέγεθος του κανάβου είναι τέτοιο ώστε η τοποθέτηση του αισθητήρα στο κέντρο να μην αφήνει κενά. Επειδή είναι πρακτικά αδύνατο ο αισθητήρας να φθάσει ακριβώς στο επιθυμητό σημείο, ορίζεται ένας κύκλος γύρω από αυτό, με ακτίνα που

εξαρτάται από την ακρίβεια πλοήγησης του αισθητήρα. Υπάρχει δυνατότητα ανίχνευσης και αποφυγής εμποδίων μέσω μιας διάταξης με υπέρυθρες ακτίνες.



Εικόνα 2.3: Πρωτότυπο κινητού ασύρματου αισθητήρα

Αν και η συγκεκριμένη διάταξη είναι ιδανική για αφιλόξενα ή επικίνδυνα για τον άνθρωπο περιβάλλοντα, το κόστος ανάπτυξης και εγκατάστασης ενός τέτοιου κινητού ασύρματου δικτύου είναι εξαιρετικά υψηλό.

Στην εφαρμογή οι θέσεις τοποθέτησης αφορούσαν ιδανική γεωμετρία, αλλά πιθανόν η χρήση γεωαισθητήρων να επιτρέπει την πλοήγηση και εγκατάστασή τους προς προεπιλεγμένες θέσεις.

2.3 Ο κλάδος της υπολογιστικής γεωμετρίας

Η γεωμετρία ήταν από τις πρώτες επιστήμες που αναπτύχθηκαν και εξελίχθηκαν στον αρχαίο κόσμο. Η σχέση του ανθρώπου με τον χώρο στον οποίο ζούσε, ήταν άρρηκτα συνδεδεμένη. Ειδικότερα για τους αρχαίους Έλληνες και Αιγύπτιους, η γεωμετρία ήταν συνώνυμη του μαθηματικού λογισμού. Περίπου το 300 π.Χ., ο μεγάλος μαθηματικός Ευκλείδης, συνέταξε το σύγγραμμά του «Στοιχεία». Αποτελείται από 13 τόμους και κωδικοποιεί για πρώτη φορά τη γεωμετρική γνώση της εποχής. Εκτός από ορισμούς και αποδείξεις θεωρημάτων, εμβαθύνει σε επιλύσεις γεωμετρικών προβλημάτων.

Η εξέλιξη των υπολογιστών, έφερε νέα διάσταση και ενδιαφέρον στη μελέτη γεωμετρικών προβλημάτων. Η νέα προσέγγιση αφορούσε στην επίλυση προβλημάτων – απλών αρχικά, ιδιαίτερα σύνθετων στην πορεία – από μια υπολογιστική οπτική γωνία.

Η αλγοριθμική επίλυση γεωμετρικών προβλημάτων με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή, αποτελεί το αντικείμενο της υπολογιστικής γεωμετρίας (computational geometry). Η πρώτη προσέγγιση με αυτό τον τρόπο

επίλυσης προβλημάτων ξεκίνησε τη δεκαετία του 1970 και εκτινάχθηκε μετά το 1980. Το 1985 έλαβε χώρα το πρώτο συνέδριο υπολογιστικής γεωμετρίας.

Αποτελεί περιοχή της επιστήμης υπολογιστών (computer science). Αν και μετράει μόνο μερικές δεκαετίες ζωής, η ραγδαία εξέλιξη των υπολογιστών, έχει ως αποτέλεσμα να αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για επίλυση προβλημάτων σε πεδία όπως η ρομποτική, τα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS), η μοντελοποίηση του χώρου, η τεχνητή όραση κ.α. (Εμίρης, 2009)

Τα πρώτα χρόνια η επίλυση γεωμετρικών προβλημάτων, χρησιμοποιούσε τεχνικές και αλγορίθμους, πολύπλοκους στην εφαρμογή, στην κατανόησή τους και στον προγραμματισμό τους σε κάποια γλώσσα προγραμματισμού. Τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκαν νέες αλγοριθμικές τεχνικές, οι οποίες βελτίωσαν και απλοποίησαν τις προηγούμενες. Έτσι μειώθηκε αισθητά ο χρόνος υπολογισμού σε πολλά προβλήματα και δόθηκε η δυνατότητα για επεξεργασία όλο και μεγαλύτερου όγκου δεδομένων.

2.3.1 Πεδία εφαρμογών της υπολογιστικής γεωμετρίας

Υπολογιστική γεωμετρία είναι το επιστημονικό πεδίο της πληροφορικής που μελετά γεωμετρικά προβλήματα και τις κατασκευαστικές τους λύσεις. Περιλαμβάνει το σχεδιασμό μεθόδων για προβλήματα γεωμετρίας και ανάλυση της πολυπλοκότητάς τους, τη μελέτη κατάλληλων δομών δεδομένων για την επίλυσή τους και τεχνικές για την αποτελεσματική υλοποίησή τους. (Εμίρης, 2009).

Εναλλακτικά θα μπορούσε να πει κανείς ότι η υπολογιστική γεωμετρία είναι το πεδίο εκείνο της γεωμετρίας, το οποίο είναι αλγοριθμικά προσπελάσιμο (Joswig & Theobald, 1998).

Στη συνέχεια δίνονται ενδεικτικά ορισμένα παραδείγματα εφαρμογών της υπολογιστικής γεωμετρίας, προκειμένου να γίνει περισσότερο κατανοητή η σημασία της. *Μερικές από τις τεχνικές και τα εργαλεία που περιγράφονται παρακάτω, όπως τα πολύγωνα Voronoi, ο τριγωνισμός Delaunay, τα κυρτά (και μη κυρτά) πολύγωνα και η εύρεση του πλησιέστερου γείτονα χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό και στην επίλυση του προβλήματος χωροθέτησης και αξιολόγησης γεωαισθητήρων.*

Τοπογραφία: Η αναπαράσταση του αναγλύφου εδάφους, απασχολούσε ανέκαθεν όσους ασχολούνταν με μετρήσεις της φυσικής γήινης επιφάνειας. Ένας από τους τρόπους αυτούς, είναι η απεικόνιση με ισοϋψείς καμπύλες.

Παλαιότερα η σχεδίαση των ισοϋψών γινόταν με τυχαίο τριγωνισμό των μετρημένων σημείων. Σήμερα πολλά λογισμικά βασίζονται στον τριγωνισμό Delaunay, ο οποίος όπως αποδεικνύεται παρακάτω αποτελεί τον βέλτιστο τριγωνισμό σημείων του χώρου.

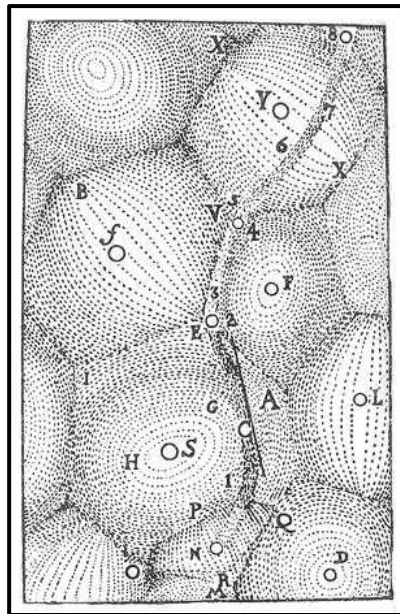
Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS): Πολλά προβλήματα τα οποία λύνονται με τη βοήθεια λογισμικών GIS, ανάγονται σε προβλήματα υπολογιστικής γεωμετρίας. Ενδεικτικά αναφέρονται η αλληλεπίθεση διαφορετικών χαρτογραφικών υποβάθρων, η εύρεση σημείων που βρίσκονται εντός ή εκτός συγκεκριμένης περιοχής, προβλήματα βέλτιστης διαδρομής, χαρτογραφικής γενίκευσης, δόμηση τοπολογίας, χωρική ανάλυση κ.α. (Chazelle & CG Impact Task Force, 1996).

Ρομποτική: Ένα θεμελιώδες πρόβλημα της ρομποτικής αφορά στην πλοήγηση ανάμεσα σε δεδομένα εμπόδια. Έτσι η διαδρομή ενός ρομπότ (ή μη επανδρωμένου οχήματος) από ένα δεδομένο αρχικό σημείο προς ένα τελικό σημείο, εξαρτάται από τα ενδιάμεσα εμπόδια. Αρχικά πρέπει να βρεθεί αν είναι εφικτή η μετακίνηση και έπειτα να υπολογισθεί η βέλτιστη διαδρομή. Η πλοήγηση ανάμεσα σε πολυγωνικά εμπόδια, αντιμετωπίζεται μέσω της διάταξης ευθυγράμμων τμημάτων και μπορεί να προσεγγισθεί και μέσω ενός διαγράμματος Voronoi (Εμίρης, 2009).

Ορατότητα και δίκτυα: Πολλά προβλήματα μοντελοποιούνται ως προβλήματα ορατότητας ανάμεσα σε εμπόδια. Το γνωστότερο, ίσως, τέτοιο πρόβλημα είναι το πρόβλημα φύλαξης ενός μουσείου, όπου δεδομένων των εμποδίων (τοιχών) ζητείται ο ελάχιστων αριθμός φρουρών (ή αισθητήρων) για την πλήρη οπτική κάλυψη του χώρου (Klee, 1969). Το πρόβλημα μπορεί να γενικευθεί και σε προβλήματα που σχετίζονται με την ασύρματη τηλεπικοινωνιακή κάλυψη μιας περιοχής, καθώς μια περιοχή μπορεί να μοντελοποιηθεί από ένα σύνολο πολυγωνικών γραμμών και να υποδιαιρεθεί σε μικρότερες με τεχνικές δέντρων. Το μοντέλο προϋποθέτει την χωρίς εμπόδια επικοινωνία μεταξύ των σταθμών. Στις περισσότερες περιπτώσεις η πλήρης κάλυψη είναι πρακτικά αδύνατη ή οικονομικά ασύμφορη, συνεπώς το πρόβλημα μετατοπίζεται στην εύρεση των κατάλληλων θέσεων, ώστε η κάλυψη να είναι η μέγιστη δυνατή. Εφαρμογές των προσεγγιστικών μεθόδων, δείχνουν ότι για τις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις, οι προσεγγιστικές λύσεις, είναι ταυτόχρονα και οι βέλτιστες. Σημαντικό πρόβλημα στον τομέα, παραμένει η διατύπωση οποιασδήποτε προσεγγιστικής λύσης για τις περιπτώσεις ελαχιστοποίησης του αριθμού των σταθμών (Εμίρης, 2009).

2.4 Πολύγωνα Voronoi

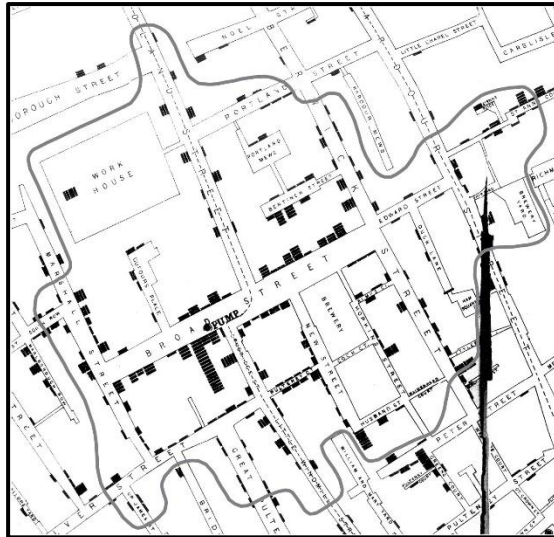
Οι πρώτες αναφορές στα διαγράμματα Voronoi έγιναν κατά την περίοδο της Αναγέννησης από τον Κέπλερ (1571-1630) και τον Καρτέσιο (Descartes, 1596-1650). Ο τελευταίος τα χρησιμοποίησε για να αποδείξει ότι η κατανομή της ύλης στο σύμπαν σχηματίζει δίνες, με κέντρο συγκεκριμένα αστέρια. (εικόνα 2.4). (Liebling & Pournin, 2012)



Εικόνα 2.4: Η χρήση των πολυγώνων Voronoi από τον Καρτέσιο

Στην πράξη χρησιμοποιήθηκαν και από το Βρετανό φυσικό John Snow (1813-1858), σχεδόν δύο αιώνες αργότερα, το 1854. Αυτός χρησιμοποίησε τις ιδιότητές τους για να απεικονίσει και να αποδείξει ότι η πλειοψηφία των ανθρώπων που απεβίωσαν κατά την επιδημία χολέρας που ξέσπασε σε προάστιο του Λονδίνου, ήταν κάτοικοι μιας περιοχής η οποία απείχε τη μικρότερη απόσταση από μια συγκεκριμένη υδραντλία, σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη αντλία. Το διάγραμμα του είναι ο πιο γνωστός χάρτης εξάπλωσης ασθένειας του 19^{ου} αιώνα (εικόνα 2.5), ενώ ο Snow θεωρείται ο πατέρας της σύγχρονης επιδημιολογίας. (Meade, 1980).

Την ίδια περίπου χρονική περίοδο, ο Γερμανός μαθηματικός Dirichlet (1805-1859), χρησιμοποίησε τα πολύγωνα Voronoi, στη μελέτη του σχετικά με τα πολυώνυμα. Σήμερα, τα διαγράμματα Voronoi, αποκαλούνται επίσης και διαμερίσεις Dirichlet.



Εικόνα 2.5: Ο χάρτης εξάπλωσης ασθένειας του Snow

Τριάντα χρόνια αργότερα, ο Ρώσος μαθηματικός Georgy Fedoseevich Voronoi (1868-1908), επέκτεινε την εργασία του Dirichlet σχετικά με τα πολύγωνα και μελέτησε τις ιδιότητές τους στη γενική περίπτωση, σε η διαστάσεις, απ' όπου τελικά τα πολύγωνα Voronoi, πήραν το όνομά τους (Κατσαβρία, 2011), (Liebling & Pournin, 2012).

Σήμερα τα πολύγωνα Voronoi (και ο τριγωνισμός Delaunay, ο οποίος θα αναπτυχθεί σε επόμενο κεφάλαιο), χρησιμοποιούνται μεταξύ άλλων και στην επιστήμη της υπολογιστικής γεωμετρίας, για γεωμετρική μοντελοποίηση (Hoffmann, Kettner, & Naher, 2004), αλλά και σε αριθμητικές μεθόδους για την επίλυση διαφορικών εξισώσεων (Stillman, Takayama, & Vershelde, 2008).

Με τον όρο διάγραμμα Voronoi, στο χώρο των δύο διαστάσεων, νοείται ο διαχωρισμός ενός υποσυνόλου του χώρου σε κυρτά πολύγωνα με συγκεκριμένες ιδιότητες. Κάθε πολύγωνο δημιουργείται από ένα σημείο – εστία, έτσι ώστε κάθε σημείο του πολυγώνου, να βρίσκεται πλησιέστερα στη συγκεκριμένη εστία, σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη.

Πριν δοθεί ο ορισμός της διαμέρισης Voronoi είναι σκόπιμο να δοθεί ο μαθηματικός ορισμός μιας οποιασδήποτε διαμέρισης του χώρου.

Έστω ένα ανοιχτό σύνολο $\Omega \in \mathbb{R}^N$. Το σύνολο $\{V_i\}_{i=1}^k$, καλείται διάμεριση (κατάτμηση) του Ω , εάν $V_i \subset \bar{\Omega}$:

α) $\forall i = 1, \dots, k$

β) $V_i \cap V_j = \emptyset$, για $j \neq i$

γ) $\cup_{i=1}^k \bar{V}_i = \bar{\Omega}$

Αποδίδοντας τον ορισμό της διαμέρισης Voronoi με μαθηματικούς όρους, προκύπτει ο ακόλουθος ορισμός:

Έστω ένα σύνολο εστιών – σημείων $\{z_i\}_{i=1}^k$, τα οποία ανήκουν στο κλειστό σύνολο $\bar{\Omega} \in \mathbb{R}^N$. Το πολύγωνο Voronoi, \hat{V}_i , που αντιστοιχεί στην εστία z_i , ορίζεται ως:

$$\hat{V}_i = \{x \in \Omega \mid \|x - z_i\| < \|x - z_j\| \forall j = 1, \dots, k, j \neq i\}, \quad (2.1)$$

όπου $\|\cdot\|$, η Ευκλείδεια νόρμα (διανυσματική απόσταση) στον \mathbb{R}^N .

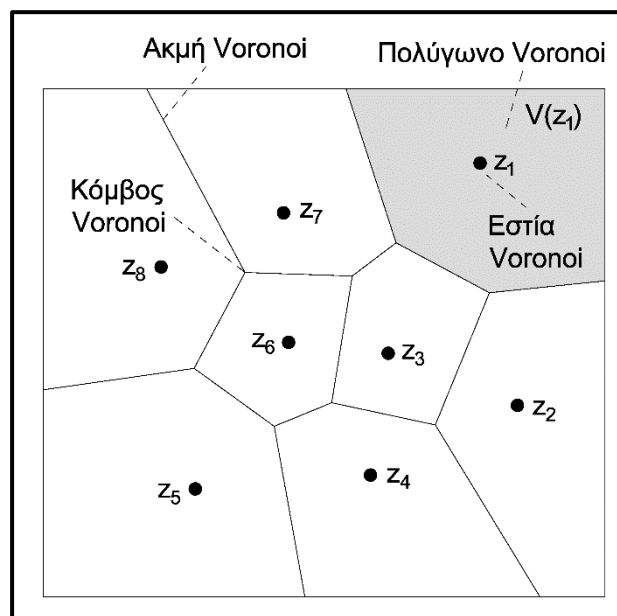
Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζονται κάποιες βασικές έννοιες που αφορούν στα πολύγωνα Voronoi:

Εστία Voronoi (generator): Είναι το σύνολο των σημείων $\{z_i\}_{i=1}^k$ που ανήκουν στο κλειστό σύνολο $\bar{\Omega} \in \mathbb{R}^N$ ενός διαγράμματος Voronoi, με τα οποία σχηματίζονται τα πολύγωνα Voronoi.

Πολύγωνο Voronoi (Region): Το κυρτό πολύγωνο (σε χώρο δύο διαστάσεων) γύρω από μια εστία που περιέχει κάθε σημείο του χώρου, που απέχει τη μικρότερη απόσταση σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη εστία.

Ακμή Voronoi (Edge): Το ευθύγραμμο τμήμα ή η ημιευθεία που περιέχει όλα τα σημεία που ισαπέχουν μεταξύ δύο όμορων εστιών.

Κόμβος Voronoi (Vertex): Είναι η τομή τριών (η περισσότερων, αναλόγως των περιορισμών που έχουν τεθεί) ακμών Voronoi.



Σχήμα 2.6: Βασικές έννοιες διαγράμματος Voronoi

Από τον ορισμό προκύπτουν και οι βασικές ιδιότητες των πολυγώνων, οι οποίες είναι:

- i. Αν το πολύγωνο Voronoi που προκύπτει από την εστία z_i , περιέχει το σημείο k , τότε η εστία z_i , βρίσκεται εγγύτερα στο σημείο k , από οποιαδήποτε άλλη εστία.
- ii. Για συγκεκριμένο σύνολο εστιών $Z = \{z_1, \dots, z_n\} \in \mathbb{R}^N$, το διάγραμμα Voronoi του Z , είναι μοναδικό.
- iii. Για κάθε κόμβο q_i ενός διαγράμματος Voronoi, υπάρχει κύκλος C_i , ο οποίος διέρχεται από τουλάχιστον 3 εστίες χωρίς να περιέχει άλλη εστία στο εσωτερικό του. Ο κύκλος αυτός είναι ο μέγιστος κενός κύκλος του κόμβου q_i (Burns, 2009).

Σήμερα τα πολύγωνα Voronoi βρίσκουν εφαρμογή σε ένα ευρύ πλήθος επιστημών. Αναφέροντας μόνο ορισμένες από αυτές, στις φυσικές επιστήμες (βιολογία, υδρολογία, αστροφυσική, μετεωρολογία), ιατρική, μηχανική (επιστήμη υλικών, χημεία, τοπογραφία), πληροφορική (δίκτυα υπολογιστών, επεξεργασία εικόνας, συμπίεση δεδομένων) κ.α.

2.5 Κεντροειδής διαμέριση Voronoi

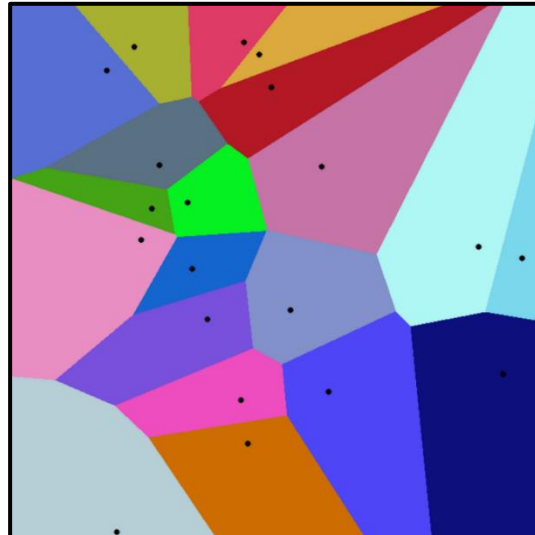
Παρά την ευελιξία και το πλήθος εφαρμογών στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα διαγράμματα Voronoi, εξ' ορισμού παρουσιάζουν χαρακτηριστικά τα οποία είναι ανεπιθύμητα σε άλλες εφαρμογές.

Το πιο σημαντικό από αυτά, είναι ότι η εστία ενός πολυγώνου Voronoi δεν συμπίπτει με το κέντρο βάρους του πολυγώνου. Έχοντας ως κριτήριο για τη δημιουργία των πολυγώνων μόνο την απόσταση των σημείων από την εστία, οι ακμές που δημιουργούνται εξαρτώνται μόνο από τη σχετική θέση των εστιών στο χώρο. Έτσι τα πολύγωνα που προκύπτουν έχουν ακανόνιστο σχήμα, με διαφορετικά μήκη ακμών (σχήμα 2.7).

Η κεντροειδής διαμέριση Voronoi (CVT) είναι μια ειδική κατηγορία των πολυγώνων Voronoi, κατά την οποία η εστία κάθε πολυγώνου, ταυτίζεται με το κέντρο βάρους του, όπως αυτό προκύπτει από κάποια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Ουσιαστικά προσεγγίζει μια ιδανική κατάτμηση του χώρου, μέσω της βέλτιστης κατανομής των εστιών.

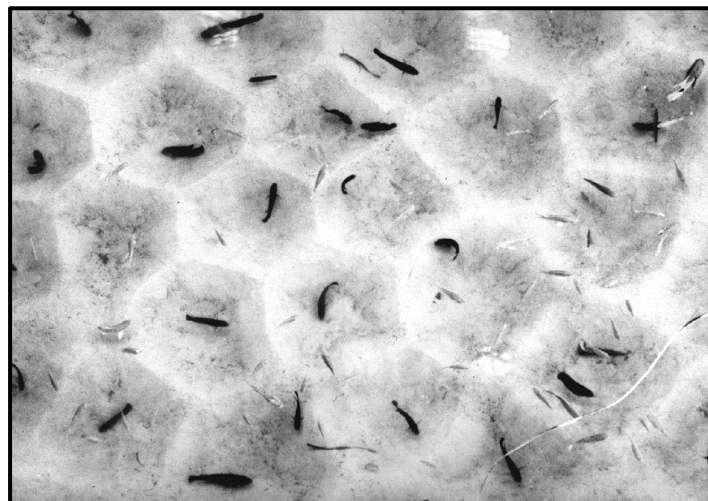
Σύμφωνα με την εικασία του Gershgorin (η οποία έχει αποδειχθεί για τις δύο διαστάσεις), «όσο αυξάνεται ο αριθμός των εστιών, η βέλτιστη CVT θα

σχηματίζει μια ομοιόμορφη κατάτμηση του χώρου, με σχήματα τα οποία θα προκύπτουν από την επανάληψη ενός και μόνο πολυτόπου. Το σχήμα του πολυτόπου εξαρτάται μόνο από τη χωρική διάσταση». Για τις δύο διαστάσεις το βασικό πολύγωνο είναι το κανονικό εξάγωνο. (Du & Wang, 2005)



Σχήμα 2.7: "Μη κανονική" διαμέριση του χώρου με πολύγωνα Voronoi

Η CVT εφαρμόζεται σε ένα πλήθος εφαρμογών, όπως στη συμπίεση δεδομένων, στην επεξεργασία εικόνων, σε μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων, στη μοριακή βιολογία, στη στατιστική, αλλά και στη μελέτη χωρικής συμπεριφοράς ζώων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα δημιουργίας CVT στη συμπεριφορά ζώων είναι οι λάκκοι αναπαραγωγής του ψαριού *tilapia* (εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6: Λάκκοι αναπαραγωγής ψαριού *tilapia*

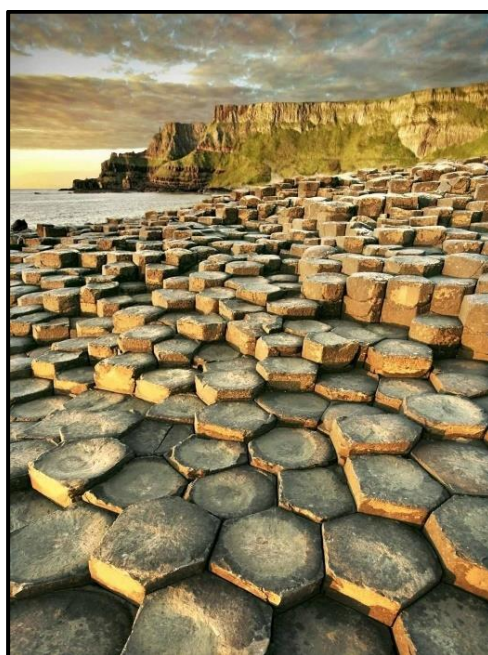
Τα αρσενικά ψάρια σκάβουν λάκκους αναπαραγωγής στον αμμώδη πυθμένα, μεταφέροντας άμμο από το κέντρο του λάκκου προς τα άκρα, δημιουργώντας τοιχώματα τα οποία οριοθετούν την περιοχή τους. Κάθε

αρσενικό προσπαθεί να βρίσκεται όσο το δυνατόν μακρύτερα από τα γειτονικά του, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό κανονικά εξάγωνα στην επιφάνεια της άμμου. (Du, Faber, & Gunzburger, *Centroidal Voronoi Tessellations: Applications and Algorithms*, 1999)

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η κεντροειδής διαμέριση Voronoi συναντάται και ως μοτίβο στη φύση, όπως για παράδειγμα στο Giant's Causeway (εικόνα 2.7). Ο συγκεκριμένος σχηματισμός βρίσκεται στη βορειοανατολική ακτή της Βόρειας Ιρλανδίας, 5 χιλιόμετρα βόρεια της πόλης Bushmills. Πρόκειται για ένα σύμπλεγμα που αποτελείται από περίπου 40.000 εξαγωνικές στήλες βασάλτη, που δημιουργήθηκαν ως μια φυσική διεργασία από λάβα η οποία ψύχθηκε και στερεοποιήθηκε. Η πιο ψηλή στήλη φτάνει τα 12 μέτρα ύψος. Οι εξαγωνικές δομές σχηματίζουν μια «σκάλα» από την κορυφή του λόφου μέχρι τη θάλασσα.

Σχηματίστηκε πριν από περίπου 50-60 εκατομμύρια χρόνια πριν, κατά την παλαιόκαινο περίοδο, όπου παρατηρείτο ηφαιστειακή δραστηριότητα στην περιοχή. Καθώς η παχύρρευστη λάβα ρέει από τον ηφαιστειακό βράχο ψύχεται και συρρικνώνεται. Η στερεοποίηση γίνεται ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. Η εκτόνωση της τάσης που δημιουργείται από τη στερεοποίηση αυτή δημιουργεί ρωγμές.

Οι ρωγμές που σχηματίζουν εξαγωνικό δίκτυο, εκτονώνουν την τάση περισσότερο αποδοτικά, από οποιαδήποτε άλλη τυχαία διεύθυνση ρωγμών (Jagla & Rojo, 2002).

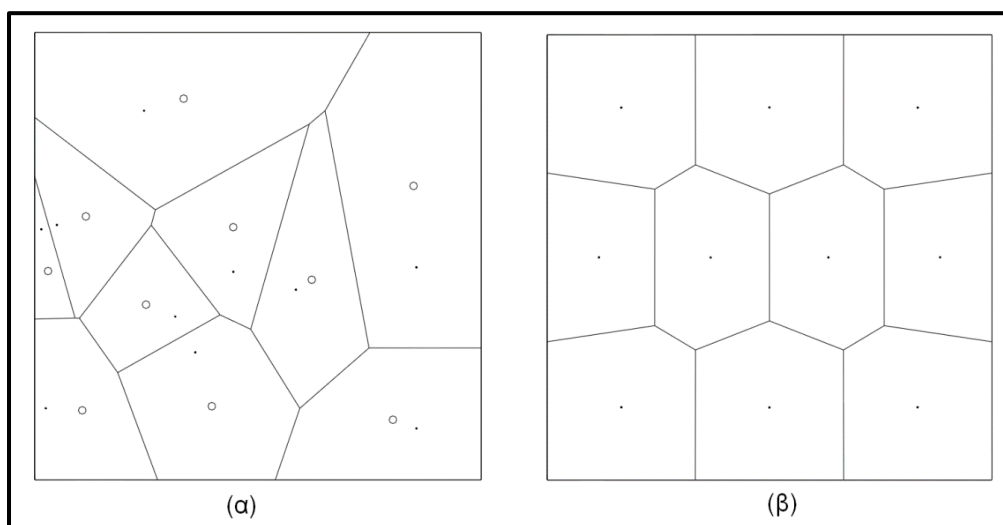


Εικόνα 2.7: Giant's Causeway (Ιρλανδία)

2.5.1 Μαθηματικό μοντέλο CVT

Συγκρίνοντας το μαθηματικό μοντέλο της κατασκευής ενός διαγράμματος Voronoi, με το μοντέλο κατασκευής ενός CVT, γίνεται σαφές ότι το δεύτερο περιέχει έναν επιπλέον περιορισμό.

Εξ' ορισμού η εστία ενός πολυγώνου στην κεντροειδή διαμέριση, είναι και το κέντρο βάρους του εκάστοτε πολυγώνου. Από τον ορισμό προκύπτει και ο επιπλέον περιορισμός στην κατασκευή ενός CVT. Στο σχήμα 2.8 φαίνεται σχηματικά ο επιπλέον περιορισμός και βασική διαφορά στα δύο διαγράμματα. (Du & Gunzberger, 2002)



Σχήμα 2.8: Διαφορά μεταξύ ενός VD και ενός CVT

Συγκεκριμένα, στο σχήμα 2.8α (VD), η εστία κάθε πολυγώνου Voronoi (σημειώνεται με μαύρη τελεία), η οποία ικανοποιεί τη βασική ιδιότητα των πολυγώνων (κάθε σημείο εντός πολυγώνου, απέχει τη μικρότερη απόσταση από την αντίστοιχη εστία. Με κύκλο σημειώνεται το κέντρο βάρους του πολυγώνου. Όπως γίνεται αντιληπτό τα δύο σημεία δεν ταυτίζονται.

Στο σχήμα 2.8β (CVT) οι τελείες είναι ταυτόχρονα οι εστίες των πολυγώνων και τα κέντρα βάρους τους.

Έστω μια περιοχή $V \subset \mathbb{R}^N$ και μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας ρ , ορισμένη στο V . Το κέντρο βάρους, z^* , του V ορίζεται ως: (Burns, 2009), (Du, Faber, & Gunzburger, Centroidal Voronoi Tessellations: Applications and Algorithms, 1999)

$$z^* = \frac{\int_V y \rho(y) dy}{\int_V \rho(y) dy} \quad (2.2)$$

Για δοθέντα k σημεία $z_i, i = 1, \dots, k$, μπορούν να προσδιορισθούν τα αντίστοιχα πολύγωνα Voronoi, $V_i, i = 1, \dots, k$.

Αντίθετα, για δοθέντα πολύγωνα Voronoi, $V_i, i = 1, \dots, k$, μπορούν να προσδιορισθούν τα κέντρα βάρους τους, $z_i^*, i = 1, \dots, k$.

Το ζητούμενο είναι τα σημεία που είναι οι εστίες των πολυγώνων, να είναι ταυτόχρονα και κέντρα βάρους. Ήτοι:

$$z_i = z_i^*, i = 1, \dots, k \quad (2.3)$$

Η συγκεκριμένη διαμέριση, ονομάζεται κεντροειδής διαμέριση Voronoi (CVT). Αποτελεί δε, ειδική περίπτωση, καθώς εν γένει, τυχαία επιλεγμένα σημεία στον \mathbb{R}^N χώρο, δεν είναι και τα κέντρα βάρους των αντίστοιχων πολυγώνων.

Το πρόβλημα κατασκευής ενός CVT μπορεί να αποδοθεί μαθηματικά ως εξής:

Δοθέντων:

μιας περιοχής $\Omega \subseteq \mathbb{R}^N$

ενός θετικού ακέραιου k

μιας συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας $\rho(y) \geq 0 \forall y \in \Omega$

Να προσδιοριστούν:

k σημεία, $z_i \in \bar{\Omega}$

k πολύγωνα V_i , τα οποία να χωρίζουν το χώρο Ω

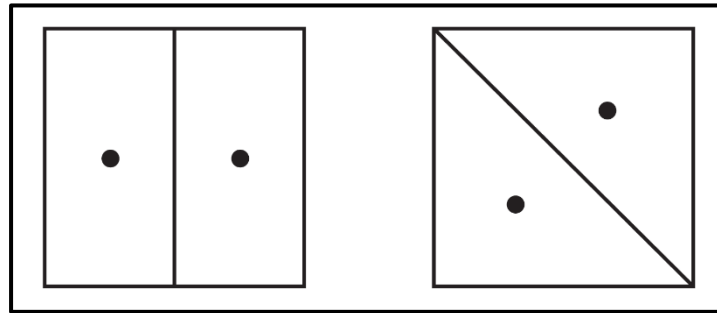
Τέτοια ώστε, για κάθε i , να ισχύει ταυτόχρονα:

το V_i να είναι το πολύγωνο Voronoi του σημείου z_i

το z_i να είναι το κέντρο βάρους του πολυγώνου V_i

Η λύση του προβλήματος στη γενική περίπτωση, μπορεί να μην είναι μοναδική. Για παράδειγμα, στην περίπτωση όπου $k = 2$, το $\Omega \subset \mathbb{R}^N$ είναι τετράγωνο και $\rho = 1$, έχει τουλάχιστον δύο λύσεις οι οποίες απεικονίζονται

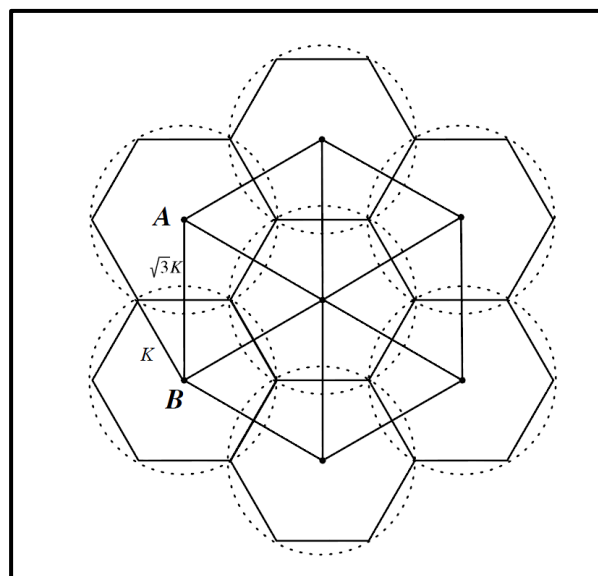
στο σχήμα 2.9. Και στις δύο περιπτώσεις, τα σημεία, τα οποία συμβολίζονται με μαύρο κύκλο είναι ταυτόχρονα εστίες των πολυγώνων και κέντρα βάρους τους.



Σχήμα 2.9: Δύο διαφορετικά CVT του ίδιου χώρου

Στην ειδική περίπτωση που η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας είναι σταθερή και ομοιόμορφη, το CVT τείνει να απαρτίζεται από κανονικά εξάγωνα, όπως στο σχήμα 2.10.

Στη βιβλιογραφία καταγράφονται αρκετοί αλγόριθμοι με τους οποίους δημιουργούνται CVT, με γνωστότερο τον αλγόριθμο του Lloyd. Άλλοι αλγόριθμοι είναι ο αλγόριθμος του McQueen, η επαναληπτική μέθοδος του Newton, αλλά και υβριδικές προσεγγίσεις τους (Du, Faber, & Gunzburger, *Centroidal Voronoi Tessellations: Applications and Algorithms*, 1999), (Burns, 2009), (Hateley, Wei, & Chen, 2015)



Σχήμα 2.10: Το ιδανικό CVT

2.5.2 Κεντροειδής διαμέριση Voronoi σε άλλες μετρικές

Η γενική απαίτηση της κεντροειδούς διαμέρισης Voronoi, μπορεί να επεκταθεί και σε περιπτώσεις του μη συνεχούς χώρου.

Αν αντικατασταθεί ο χώρος Ω , με ένα σύνολο διακριτών σημείων m , έστω:

$$W = \{y_i\}_{i=1}^m, W \in \mathbb{R}^N, \quad (2.4)$$

τότε το σύνολο $\{V_i\}_{i=1}^k$, είναι διαμέριση του W , αν

$$V_i \cap V_j = \emptyset, \forall i \neq j \text{ και} \quad (2.5)$$

$$\cup_{i=1}^k V_i = W \quad (2.6)$$

Αν $\{z_i\}_{i=1}^k$, ένα σύνολο σημείων, τα οποία ανήκουν στον \mathbb{R}^N , τα πολύγωνα Voronoi, \hat{V}_i , που αντιστοιχούν στα σημεία αυτά ορίζονται πλέον ως:

$$\hat{V}_i = \{x \in W \mid \|x - z_i\| \leq \|x - z_j\| \forall j = 1, \dots, k, j \neq i\} \quad (2.7)$$

(η ισότητα ισχύει μόνο για $i < j$)

Αν ορίζεται και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, $\rho(y)$, στο σύνολο W , τότε το κέντρο βάρους z^* , του σημειοσυνόλου $V \subset W$, ορίζεται ως:

$$\sum_{y \in V} \rho(y) |y - z^*|^2 = \inf_{z \in V^*} \sum_{y \in V} \rho(y) |y - z|^2 \quad (2.8)$$

Στην περίπτωση αυτή η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $\rho(y)$, υποδηλώνει το βάρος ή τη συμμετοχή κάθε σημείου, στον τελικό προσδιορισμό των εστιών. Σημεία με μεγαλύτερο βάρος, θα τείνουν να έχουν πιο κοντά τους τις εστίες των πολυγώνων.

Όπως γίνεται αντιληπτό, στην περίπτωση που τα σημεία έχουν διαφορετικό βάρος, το σχήμα των κεντροειδών πολυγώνων, θα ξεφεύγει από το κανονικό εξάγωνο.

Επιπλέον, η επίτευξη ιδανικής γεωμετρίας (εξάγωνα) στην περίπτωση των διακριτών σημείων, είναι σε άμεση συνάφεια με την πυκνότητα των σημείων, αλλά και με τη θέση τους. Πράγματι, όσο πιο πυκνά και ομοιόμορφα κατανεμημένα είναι τα σημεία του δείγματος, τόσο περισσότερο θα

προσομοιώνουν το συνεχή χώρο και άρα θα σχηματίζονται «κανονικά» εξάγωνα.

Η λογική δημιουργίας των πολυγώνων Voronoi και κατ' επέκταση και των CVT, μπορεί να γενικευθεί για οποιοδήποτε χώρο και μετρική και όχι απαραίτητα μόνο για την Ευκλείδεια νόρμα ℓ^2 (απόσταση σημείων σε 2 διαστάσεις).

$$\text{Έτσι η γενική μετρική: } d(x, y) = \|x - y\|_{\ell^p}^p, \quad (2.9)$$

θα μπορούσε να συμβολίζει οτιδήποτε, όπως για παράδειγμα χρονική απόσταση ή απόσταση εκπομπής σήματος.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε διάσταση και όχι μόνο για το χώρο διαστάσεων (Du & Wang, 2003). Κάτι τέτοιο θα έβρισκε εφαρμογή στην περίπτωση όπου η μελέτη χωροθέτησης γινόταν στο χώρο των τριών διαστάσεων.

2.5.3 Ο αλγόριθμος του Lloyd για κατασκευή CVT

Ο γνωστότερος αλγόριθμος με τον οποίο δομείται η κεντροειδής διαμέριση Voronoi είναι ο αλγόριθμος του Lloyd. Θεωρείται από τους κορυφαίους αλγόριθμους στην εξόρυξη δεδομένων. Προτάθηκε για πρώτη φορά το 1957 από τον Stuart Lloyd, αλλά για πρώτη φορά δημοσιεύθηκε το 1982. (Lloyd, 1982) (Κάβουρας, 2014).

Ο αλγόριθμος μπορεί να κατασκευάσει CVT είτε από το συνεχή χώρο για συγκεκριμένη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, είτε από ένα σύνολο τυχαία κατανεμημένων σημείων.

Αρχικά επιλέγονται k τυχαίες θέσεις εστιών μέσα στον δοθέντα χώρο. Ανεξάρτητα από τη θέση των αρχικών τυχαίων σημείων, ο αλγόριθμος συγκλίνει, δηλαδή σε κάθε περίπτωση καταλήγει σε μια συγκεκριμένη τιμή για τις τελικές θέσεις (Du, Emelianenko, & Ju, 2006).

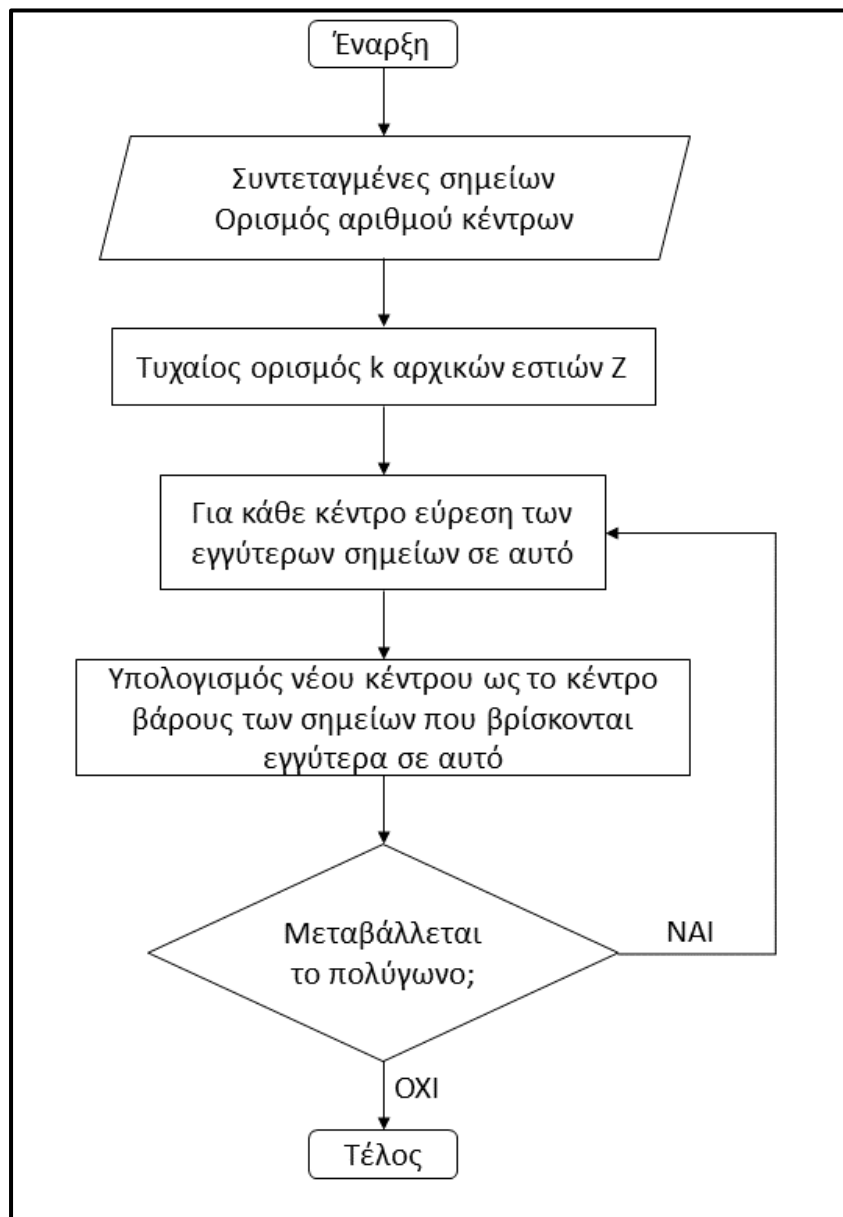
Στη συνέχεια κατασκευάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα Voronoi. Από το σχήμα κάθε πολυγώνου ή τα σημεία που αυτό περιλαμβάνει, υπολογίζεται το κέντρο βάρους κάθε πολυγώνου. Τέλος, η αρχική εστία μετακινείται στο υπολογισθέν κέντρο βάρους. Τα βήματα επαναλαμβάνονται ώσπου η μετακίνηση της εστίας προς τα νέα κέντρο βάρους να είναι μικρότερη από ένα προκαθορισμένο κατώφλι (όριο).

Η μέθοδος μπορεί να παρασταθεί αλγοριθμικά ως εξής (πίνακας 2.1):

1. Τυχαίος ορισμός k αρχικών εστιών $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_k\}$
2. Για κάθε $i \in \{1, \dots, k\}$, όρισε το πολύγωνο V_i , ως το σύνολο των σημείων που βρίσκονται εγγύτερα στο z_i , απ' ότι στο z_j , $\forall j \neq i$
3. Για κάθε $i \in \{1, \dots, k\}$, όρισε το z_i , ως το κέντρο βάρους όλων των σημείων του V_i
4. Επανάλαβε τα βήματα 2 και 3 μέχρι να μην υπάρχει καμία αλλαγή σε κανένα V_i

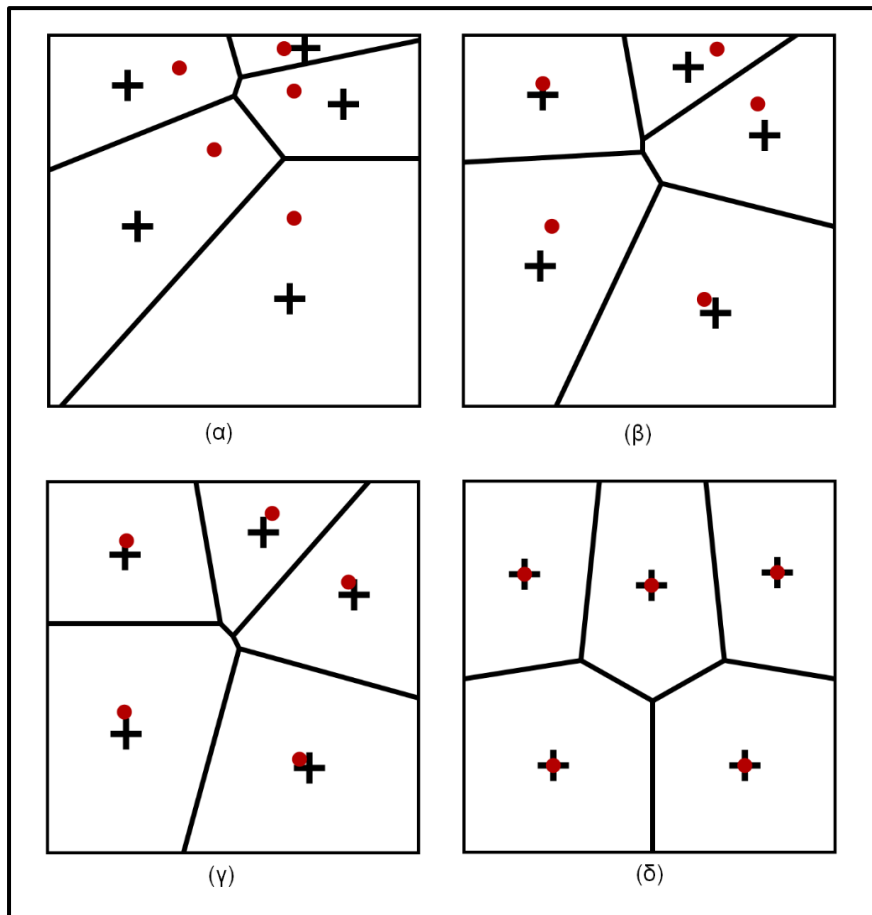
Πίνακας 2.1: Ο αλγόριθμος του Lloyd

Το διάγραμμα ροής της μεθόδου απεικονίζεται στο σχήμα 2.11:



Σχήμα 2.11: Διάγραμμα ροής αλγόριθμου Lloyd για κατασκευή CVT

Σχηματικά η σταδιακή εξέλιξη του αλγορίθμου παρουσιάζεται στο σχήμα 2.12:



Σχήμα 2.12: Κατασκευή CVT με τον αλγόριθμο του Lloyd, μετά την 1η, 2η, 3η και 15η επανάληψη

Στο σχήμα 2.12α έχουν επιλεγεί 5 εστίες (κόκκινες τελείες) που δημιουργούν τα πολύγωνα Voronoi, από τα οποία προκύπτουν τα αντίστοιχα κέντρα βάρους (μαύροι σταυροί). Στο σχήμα 2.12β έχει ολοκληρωθεί η 2^η επανάληψη του αλγορίθμου. Οι 5 εστίες έχουν μετακινηθεί εκεί όπου βρίσκονταν οι μαύροι σταυροί, κατασκευάστηκαν τα νέα πολύγωνα και υπολογίστηκαν τα νέα κέντρα βάρους. Μετά την τρίτη επανάληψη (σχήμα 2.12γ) οι εστίες έχουν πλησιάσει πολύ κοντά στα κέντρα βάρους των πολυγώνων. Τέλος, στο σχήμα 2.12δ (15^η επανάληψη) οι εστίες των πολυγώνων ταυτίζονται με τα αντίστοιχα κέντρα βάρους και ο αλγόριθμος τερματίζεται. Τα κεντροειδή πολύγωνα Voronoi έχουν σχηματισθεί.

2.6 Χωροθέτηση ασύρματου δικτύου γεωαισθητήρων με χρήση CVT

Όπως έγινε σαφές από τη μαθηματική προσέγγιση που προηγήθηκε, η δημιουργία κεντροειδούς διαμέρισης Voronoi (CVT) μπορεί να επιτύχει βέλτιστη γεωμετρία για την εκάστοτε κατανομή σημείων στο χώρο.

Προφανώς όσο περισσότερο ομοιόμορφα κατανεμημένα και πυκνά είναι τα σημεία και όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των κέντρων, τόσο περισσότερο τα πολύγωνα που δημιουργούνται, προσομοιάζουν σε κανονικά εξάγωνα.

Σε εφαρμογές περιορισμένου πεδίου, όπου ο αριθμός τοποθέτησης γεωαισθητήρων είναι μικρός, η τοποθέτηση μπορεί να γίνει ακριβώς στις θέσεις που προκύπτουν, μετά τον τερματισμό του αλγορίθμου Lloyd.

Υπενθυμίζεται ότι οι θέσεις αυτές είναι τα κέντρα βάρους των πολυγώνων και δεν αναφέρονται σε συγκεκριμένα σημεία του αρχικού συνόλου. Παρόλ' αυτά υπάρχουν περιπτώσεις που επιβάλλεται οι θέσεις εγκατάστασης να ανήκουν στο αρχικό σύνολο σημείων. Συνεπώς προκύπτουν επιπλέον δεσμεύσεις.

Για παράδειγμα, όταν η εφαρμογή απαιτεί την εγκατάσταση μερικών χιλιάδων γεωαισθητήρων, η εγκατάσταση σε ιδανικές θέσεις ή τις θέσεις που υποδεικνύει ο αλγόριθμος, αυξάνει σημαντικά το κόστος και το χρόνο εγκατάστασης. Ενδεχομένως η εγκατάσταση σε ιδανικές θέσεις να είναι και αδύνατη.

Έτσι αποτελεί μονόδρομο η εγκατάστασή τους να γίνει σε υπαρκτές/δεσμευμένες θέσεις, όπως αυτές προκύπτουν από τα δεδομένα του προβλήματος. Τέτοιες θέσεις θα ήταν συγκεκριμένα σημεία πάνω σε ένα πρανές, στην περίπτωση παρατήρησης παραμορφώσεων ή συγκεκριμένα δέντρα σε μια μεγάλη δασική έκταση, στην περίπτωση παρατήρησης πυρκαγιάς.

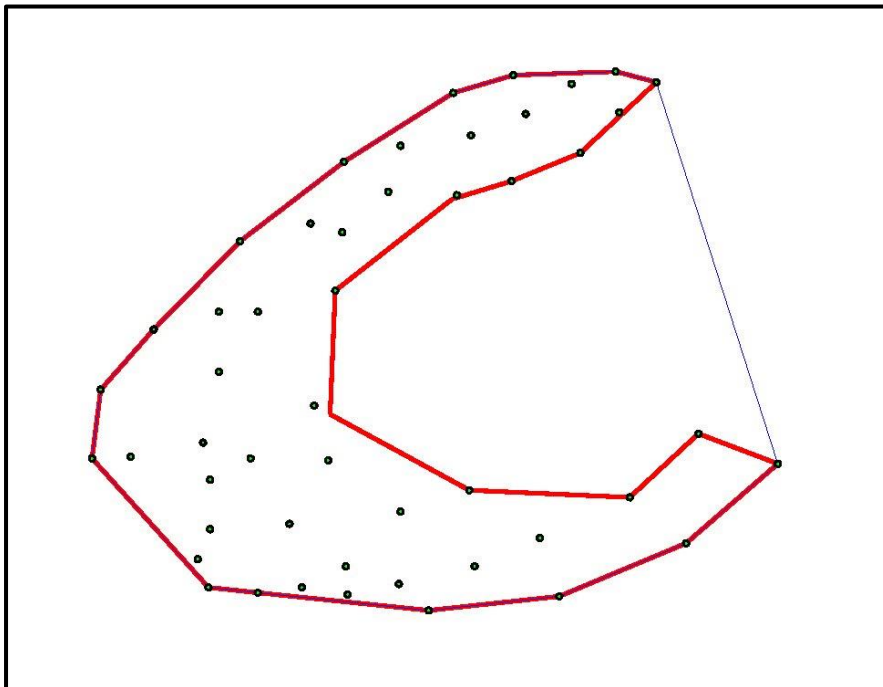
Έτσι λοιπόν η προσέγγιση της βέλτιστης λύσης θα γίνει σε δύο στάδια:

- 1) Προσδιορισμός των βέλτιστων θεωρητικών θέσεων των γεωαισθητήρων, όπως αυτές προκύπτουν για τη συγκεκριμένη γεωμετρία.
- 2) Εύρεση των πραγματικών θέσεων εγκατάστασης, με μετατόπιση της θεωρητικής θέσης στην πλησιέστερη υπαρκτή θέση.

2.6.1 Προσδιορισμός βέλτιστων θεωρητικών θέσεων εγκατάστασης

Για να είναι δυνατή η δημιουργία πολυγώνων CVT είναι απαραίτητο να υπάρχει ένα μεγάλο σύνολο σημείων που θα καθορίζουν το υποσύνολο του χώρου (περιοχή μελέτης) αλλά και μεταξύ αυτών θα πρέπει να επιλεγούν οι θέσεις εγκατάστασης. Τα σημεία αυτά μπορεί να έχουν προκύψει από μετρήσεις με επίγειες ή δορυφορικές μεθόδους ή ακόμα και με τεχνικές αναγνώρισης από αεροφωτογραφίες ή δορυφορικές εικόνες.

Στην περίπτωση όπου προκύπτουν περιοχές χωρίς σημεία, είναι δυνατόν να εξαιρεθούν τελείως ή το σύνολο της περιοχής να καταταμηθεί σε μικρότερα τμήματα και κάθε ένα να αντιμετωπισθεί ξεχωριστά. (σχήμα 2.13)



Σχήμα 2.13: Διαφορά μεταξύ κυρτού και μη κυρτού πολυγώνου

Για τον προσδιορισμό του εμβαδού της έκτασης που καταλαμβάνουν τα σημεία δεν χρησιμοποιείται το κυρτό περίβλημα (convex hull), όπως συνηθίζεται στα περισσότερα προβλήματα υπολογιστικής γεωμετρίας (de Berg, Cheong, van Kreveld, & Overmars, 2008), (Joswig & Theobald, 1998) αλλά το μη κυρτό πολύγωνο (noncave polygon) που περιέχει όλα τα σημεία (γενικευμένο, εάν απαιτείται).

Μία σημαντική παράμετρος είναι ο ελάχιστος απαιτούμενος αριθμός αισθητήρων (ή αλλιώς οι εστίες των πολυγώνων CVT). Αυτός είναι συνάρτηση του εμβαδού της συνολικής έκτασης που καταλαμβάνουν τα σημεία και του βεληνεκούς παρατήρησης των αισθητήρων.

Το βεληνεκές του αισθητήρα R_s , καθορίζει την έκταση που αυτός μπορεί να επιβλέψει, δεδομένου ότι παρατηρεί το φαινόμενο γύρω του, σε ακτίνα κύκλου ίσης με το βεληνεκές του. Στην πραγματικότητα η περιοχή επίβλεψης του αισθητήρα δεν είναι ποτέ ιδανικός κύκλος, αλλά σχήμα ακανόνιστου σχήματος, δεδομένου ότι στην εμβέλεια του αισθητήρα παρεμβάλλονται και εμπόδια τα οποία μειώνουν το βεληνεκές τους προς τη διεύθυνση αυτή.

Τελευταία παράμετρος είναι ο αριθμός των επαναλήψεων μέχρι την ολοκλήρωση του αλγορίθμου. Ενώ μπορούν να προταθούν πολλά κριτήρια τερματισμού, επιλέγεται ο αλγόριθμος να τερματίζει όταν κανένας από τους N αισθητήρες (εστίες πολυγώνων), κατά τη διάρκεια του αλγορίθμου Lloyd δεν μετατοπίζεται περισσότερο από κάποια τιμή/κατώφλι η οποία καθορίζεται από το χρήστη, ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής.

Το πρόβλημα, λοιπόν, της βέλτιστης χωροθέτησης των αισθητήρων μπορεί να αποδοθεί συγκεντρωτικά ως εξής:

Δοθέντων:

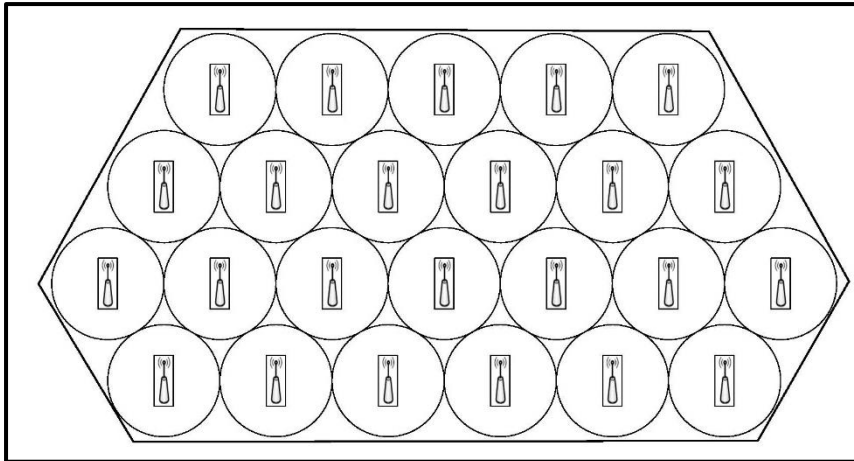
- των συντεταγμένων (x, y) των σημείων που βρίσκονται εντός της περιοχής μελέτης
- της ακτίνας R_s , του αισθητήρα που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί
- τη συνθήκη τερματισμού του αλγορίθμου του Lloyd, ήτοι τη μέγιστη απόσταση μετατόπισης των κέντρων μεταξύ των επαναλήψεων, πέραν της οποίας θεωρείται ότι αυτά παραμένουν αμετακίνητα.

Να προσδιοριστούν:

- οι θεωρητικές θέσεις των σημείων εγκατάστασης, που αντιστοιχούν στις εστίες των κεντροειδών πολυγώνων Voronoi.
- Το αντίστοιχο διάγραμμα CVT

Αρχικά προσδιορίζεται ο ελάχιστος απαιτούμενος αριθμός αισθητήρων. Μια πρώτη προσέγγιση είναι η διαίρεση του συνολικού εμβαδού της έκτασης προς το εμβαδόν παρατήρησης του αισθητήρα με συγκεκριμένο βεληνεκές (σχήμα 2.14).

$$N = \frac{\text{Εμβαδόν έκτασης}}{\pi \times R_s^2} \quad (2.13)$$



Σχήμα 2.14: Προσδιορισμός ελάχιστου αριθμού αισθητήρων

Σε καμία περίπτωση ο τελικός απαιτούμενος αριθμός αισθητήρων δε μπορεί να είναι μικρότερος από αυτόν, ενώ είναι σχεδόν βέβαιο ότι κατά τη διάρκεια εφαρμογής της μεθόδου θα αποδειχθεί ότι ο αριθμός αυτός είναι ανεπαρκής και θα απαιτηθεί ανατροφοδότηση του συστήματος με μεγαλύτερο αριθμό αισθητήρων.

Στη συνέχεια, επιλέγονται N τυχαίες θέσεις τοποθέτησης εντός της περιοχής μελέτης και κατασκευάζονται τα αντίστοιχα πολύγωνα CVT.

Οι θεωρητικές θέσεις μετατοπίζονται, με την επαναληπτική διαδικασία που περιγράφεται στον πίνακα 2.1, μέχρις ότου να πληρείται το κριτήριο τερματισμού του αλγορίθμου.

Μετά την επαναληπτική διαδικασία προκύπτουν οι τελικές θέσεις των θεωρητικών σημείων εγκατάστασης των γεωαισθητήρων, σε γραφικό περιβάλλον, αλλά και με τη μορφή αρχείου συντεταγμένων. Επιπλέον η απεικόνιση των πολυγώνων CVT δίνουν μια πρώτη οπτική αίσθηση σχετικά με το πόσο καλά επιτεύχθηκε η επιθυμητή γεωμετρία.

Χρήσιμοι είναι και κάποια επιπλέον στοιχεία, όπως:

- ο αριθμός των επαναλήψεων μέχρι τη σύγκλιση/τερματισμό του αλγορίθμου
- το διάγραμμα της μέσης μετατόπισης των εστιών σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου.

2.6.2 Προσδιορισμός πραγματικών θέσεων εγκατάστασης

Μέχρι το σημείο αυτό η λύση θα ήταν αποδεκτή και η μεθοδολογία χρήσιμη ακόμα και για εφαρμογές περιορισμένου πεδίου. Όπως αναφέρθηκε όμως, μια επιπλέον απαίτηση είναι οι τελικές θέσεις να ανήκουν στο αρχικό σημειοσύνολο.

Αρχικά γίνεται έλεγχος αν κάποια από τα σημεία της θεωρητικής λύσης ταυτίζονται με τα πραγματικά σημεία. Ο χρήστης ορίζει το εύρος ανοχής (η μέγιστη απόσταση μεταξύ θεωρητικού και πραγματικού σημείου, εντός της οποίας θα θεωρείται ότι τα δύο σημεία ταυτίζονται). Η ανοχή αυτή καθορίζεται ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

Προφανώς όσο πιο αυστηρές είναι οι απαιτήσεις της εφαρμογής, τόσο πιο μικρή θα είναι η ανοχή, άρα και λιγότερο πιθανό να ταυτισθούν οι θεωρητικές και οι πραγματικές θέσεις.

Είναι εξαιρετικά απίθανο όλες ή έστω οι περισσότερες από τις θεωρητικές θέσεις που προκύπτουν από την πρώτη φάση της μεθοδολογίας να ταυτίζονται με τις πραγματικές θέσεις των σημείων.

Έτσι για τα υπόλοιπα σημεία (ή για όλα εάν δεν έχει επιτευχθεί ταύτιση για κανένα από αυτά), είναι απαραίτητο να αναζητηθούν τα κοντινότερα σημεία, τα οποία ανήκουν και στο αρχικό σύνολο σημείων. Ταυτόχρονα δεν πρέπει να αλλοιώνεται και η γεωμετρία, η οποία προέκυψε από την πρώτη φάση. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται μια ακόμα πρακτική της υπολογιστικής γεωμετρίας, αυτή του εγγύτερου γείτονα (nearest neighbor search - NNS).

Η συγκεκριμένη τεχνική αποτελεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης για την εύρεση του πλησιέστερου σημείου, από ένα σύνολο δοθέντων σημείων, για ένα συγκεκριμένο σημείο (Dasarathy, 1990). Το πρόβλημα μπορεί να αποδοθεί ως εξής:

Δοθέντων:

- ενός συνόλου S σημείων στο χώρο Ω
- ενός σημείου $q \in \Omega$

Να προσδιορισθεί:

- το πλησιέστερο σημείου του συνόλου S , στο q

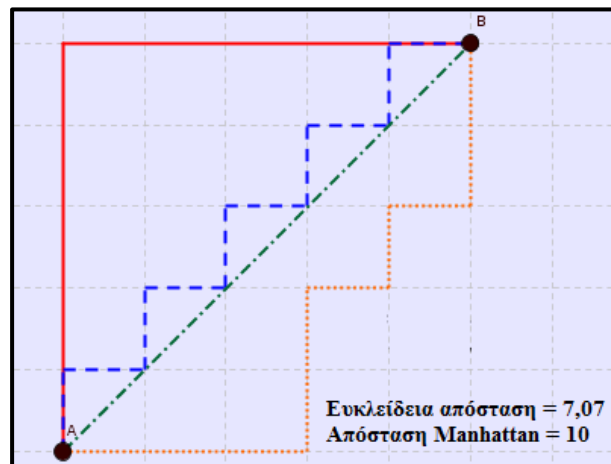
Το πρόβλημα είναι γνωστό από πολύ παλιά και στη βιβλιογραφία αναφέρεται συχνά ως «το πρόβλημα του ταχυδρομείου», όπου αναζητείται το

πλησιέστερο ταχυδρομείο για κάποιον άνθρωπο, με δεδομένη τη θέση του (Knuth, 2016).

Στην πιο κοινή μορφή του, ο χώρος Ω , είναι ο μετρικός χώρος και ως μετρική για την εύρεση του εγγύτερου γείτονα, χρησιμοποιούνται η ευκλείδεια απόσταση, η απόσταση Manhattan ή οποιαδήποτε άλλη μετρική.

Στο χώρο των δύο διαστάσεων, με τον όρο απόσταση Manhattan, ορίζεται η απόσταση μεταξύ δύο σημείων μετρημένη κατά μήκος των αξόνων σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (Han & Kamber, 2006). Πρακτικά, μπορεί να απεικονισθεί ως η απόσταση που διανύει ένα αυτοκίνητο σε μια πόλη με οικοδομικά τετράγωνα για να μεταβεί από ένα σημείο A, σε ένα σημείο B (σχήμα 2.15). Μαθηματικά ορίζεται ως εξής:

$$d(A, B) = |x_A - x_B| + |y_A - y_B| \quad (2.14)$$



Σχήμα 2.15: Διαφορά μεταξύ ευκλείδειας απόστασης και απόστασης Manhattan

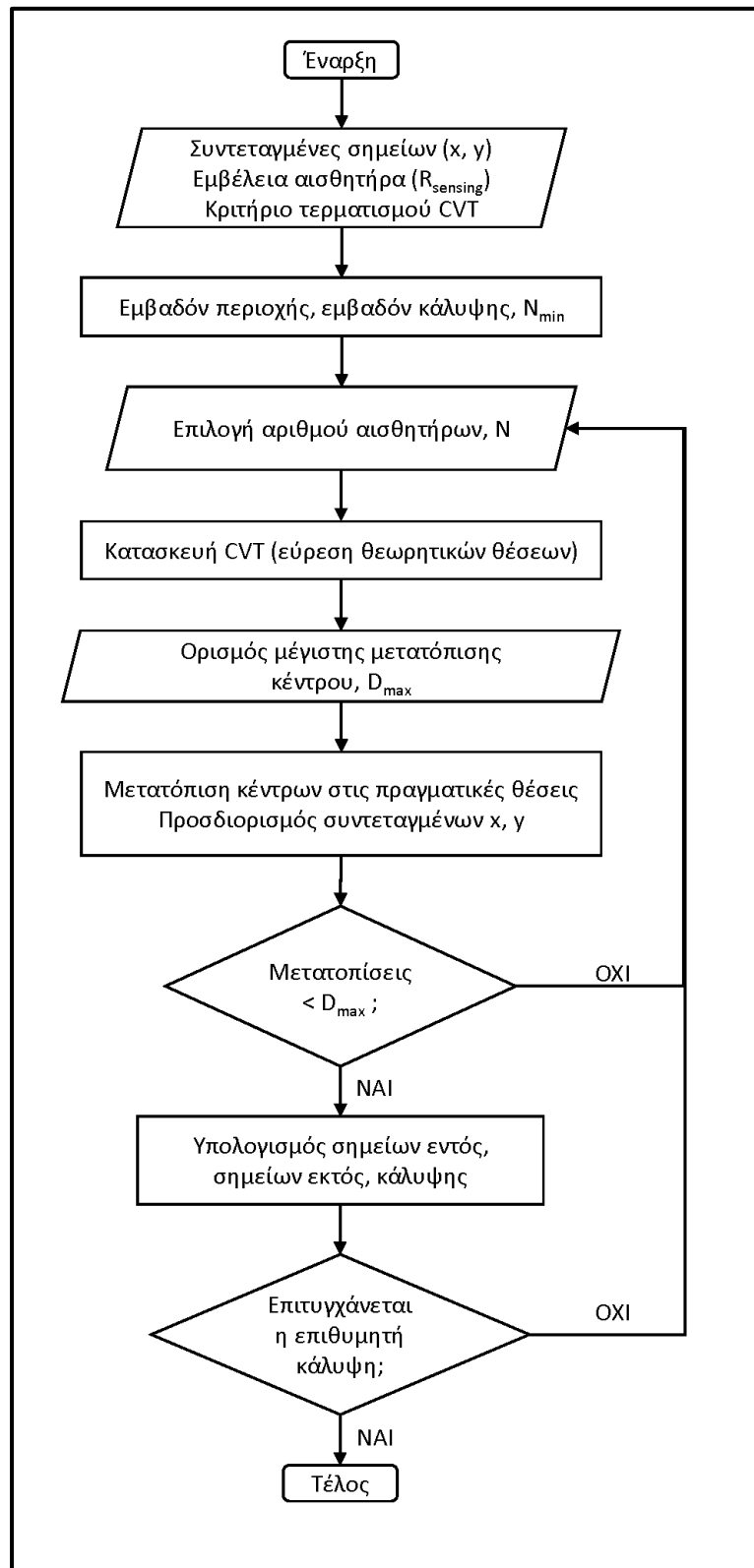
Από κάθε θεωρητική θέση τοποθέτησης ορίζεται μία ακτίνα εντός της οποίας θα αναζητηθεί το πλησιέστερο σημείο.

Γίνεται αντιληπτό ότι όσο μικρότερη είναι η ακτίνα αυτή, τόσο περισσότερο θα ταυτίζεται η τελική λύση με την θεωρητική γεωμετρία CVT. Όμως μειώνονται και οι πιθανότητες να βρεθεί πραγματικό σημείο εντός της ακτίνας αυτής.

Αντίθετα, όσο η ακτίνα αναζήτησης αυξάνεται, τόσο πιθανότερο είναι να βρεθεί κάποια πραγματική θέση εντός αυτής ώστε να είναι δυνατή η μετατόπιση του θεωρητικού σημείου, αλλά τόσο η τελική λύση θα απομακρύνεται από τη θεωρητική λύση της κεντροειδούς διαμέρισης.

Μετά το πέρας της διαδικασίας προκύπτουν οι πραγματικές θέσεις τοποθέτησης των αισθητήρων του δικτύου, τόσο σε γραφικό περιβάλλον, όσο

και σε μορφή πίνακα συντεταγμένων. Το διάγραμμα ροής της προτεινόμενης μεθοδολογίας απεικονίζεται στο σχήμα 2.16.



Σχήμα 2.16: Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας χωροθέτησης

Επιπλέον μπορούν να προκύψουν χρήσιμα στατιστικά στοιχεία, όπως:

- τον αριθμό και το ποσοστό των σημείων που δεν βρίσκονται στη ζώνη παρατήρησης κάποιου αισθητήρα
- τον αριθμό και το ποσοστό αυτών που βρίσκονται στην εποπτεία 2 ή περισσότερων αισθητήρων (αυξάνοντας την εφεδρεία/αξιοπιστία του δικτύου).

Σε πολλές εφαρμογές αυτό που ενδιαφέρει είναι η πλήρης κάλυψη όλης της περιοχής μελέτης. Από τα στατιστικά που προκύπτουν από την προτεινόμενη μεθοδολογία, ο χρήστης μπορεί να ανατροφοδοτήσει το σύστημα αυξάνοντας (ή μειώνοντας) τον αριθμό των αισθητήρων, ώστε να επιτύχει την επιθυμητή κάλυψη ή την επιθυμητή εφεδρεία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Μεθοδολογία αξιολόγησης χωροθέτησης ασύρματου δικτύου γεωαισθητήρων

3.1 Η σημασία της αξιολόγησης

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναπτύχθηκε ο αλγόριθμος επιλογής των κατάλληλων θέσεων τοποθέτησης των γεωαισθητήρων. Με βάση τα δοθέντα κριτήρια ο αλγόριθμος καταλήγει στις ιδανικές θέσεις εγκατάστασης.

Επιπλέον, η επίλυση του προβλήματος εξαρτάται από ένα πλήθος παραμέτρων και περιορισμών, όπως το πλήθος των υποψήφιων σημείων, η ακτίνα ανίχνευσης του παρατηρούμενου φαινομένου κ.α.

Οι στατιστικοί δείκτες που προκύπτουν μαζί με τις θέσεις εγκατάστασης, καταδεικνύουν την ανάγκη για ανατροφοδότηση του συστήματος με νέες παραμέτρους (π.χ. διαφορετικό αριθμό αισθητήρων ή διαφορετικό τύπο αισθητήρα, που συνεπάγεται διαφορετική εμβέλεια παρατήρησης).

Πιο συγκεκριμένα, το ποσοστό των σημείων που δεν βρίσκονται στη ζώνη παρατήρησης κάποιου αισθητήρα, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ανατροφοδότηση του προγράμματος με επιπλέον αριθμό αισθητήρων, ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής και την επιθυμητή κάλυψη. Το ποσοστό αυτών που βρίσκονται στην εποπτεία 2 ή περισσότερων αισθητήρων σχετίζεται άμεσα με την εφεδρεία/αξιοπιστία του δικτύου. Σε πολλές εφαρμογές θεωρείται κρίσιμο κάθε σημείο παρατήρησης (ή κάποιο ποσοστό αυτών) να βρίσκεται στην εμβέλεια περισσότερων του ενός αισθητήρων για λόγους ασφαλείας.

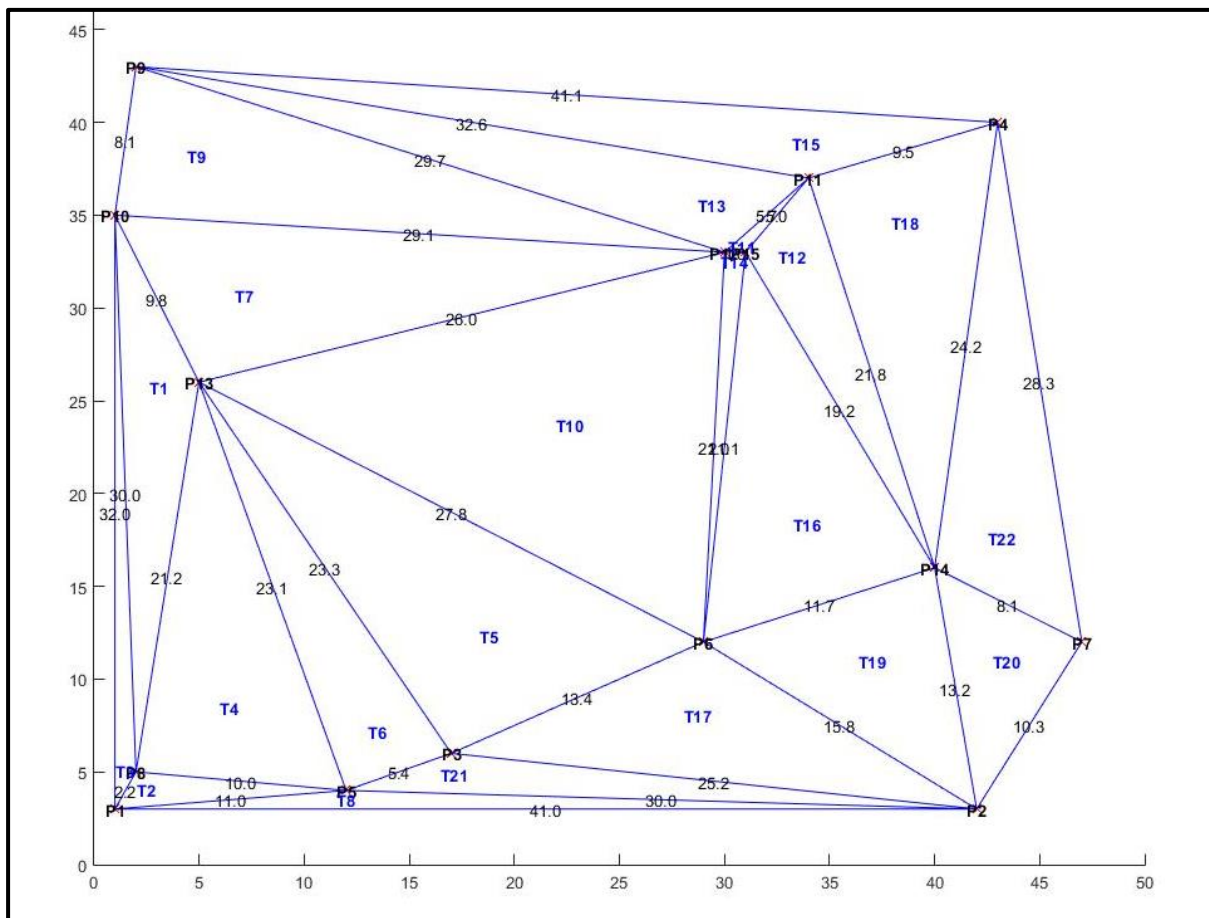
Τέλος, δε μπορεί να αγνοηθεί ότι οι υποψήφιες θέσεις τοποθέτησης, παρουσιάζουν τυχαία κατανομή και κάθε περίπτωση παρουσιάζει διαφοροποιήσεις από οποιαδήποτε άλλη.

Όπως αποδείχθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η ιδανική τοπολογία ασύρματου δικτύου για εφαρμογές ευρείας κλίμακας είναι η τοπολογία αστέρα – κυψέλης. Αντίστοιχα η ιδανική γεωμετρία είναι αυτή του κανάβου ισοπλεύρων τριγώνων. Θεωρητικά όλοι οι αισθητήρες πρέπει να είναι τοποθετημένοι στις κορυφές ισοπλεύρων τριγώνων, ώστε να σχηματίζεται ένα πλέγμα κανάβου αποτελούμενου από ισόπλευρα τρίγωνα.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του πλέγματος (κανάβου) ισοπλεύρων τριγώνων, είναι ότι κάθε σημείο ισαπέχει από όλα τα γειτονικά του. Από αυτό

προκύπτει ότι για δεδομένη ακτίνα ανίχνευσης, ο ελάχιστος αριθμός σημείων που απαιτούνται για να καλύψουν το σύνολο της περιοχής μελέτης, είναι τα σημεία που βρίσκονται στις κορυφές κανονικού τριγωνικού κανάβου.

Στην ιδανική περίπτωση, όπου τα σημεία της περιοχής μελέτης ήταν πυκνά και ομοιόμορφα κατανομημένα, η τελική λύση θα αποτελείτο από ισόπλευρα τρίγωνα. Σε οποιαδήποτε άλλη, τυχαία περίπτωση τα σημεία θα σχηματίζουν ένα πλέγμα ακανόνιστων (τυχαίων) τριγώνων (TIN). (σχήμα 3.1)



Σχήμα 3.1: Δημιουργία TIN από τις τελικές θέσεις εγκατάστασης

Γεννάται λοιπόν το ερώτημα, κατά πόσον η λύση κάλυψης που προέκυψε από τη μεθοδολογία χωροθέτησης, προσεγγίζει την ιδανική λύση και σε τι βαθμό. Άλλωστε καμία λύση δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον, αν δεν συνοδεύεται από το μέτρο αξιολόγησής της. Μόνο έτσι είναι δυνατόν να αντιληφθεί ο χρήστης πόσο καλά προσεγγίζουν τη λύση τα διαφορετικά σενάρια και αν κρίνεται απαραίτητο να γίνει ανατροφοδότηση του συστήματος για εξαγωγή νέας βελτιωμένης πρότασης χωροθέτησης.

Στο παρόν κεφάλαιο, αναζητείται η μετρική, η οποία να περιγράφει καλύτερα τη συνάφεια της θεωρητικής και της προτεινόμενης τελικά λύσης. Αναλύονται οι ιδιότητες, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε μίας και τελικά επιλέγεται η καλύτερη εξ' αυτών. Με βάση αυτή δομείται ο αλγόριθμος αξιολόγησης.

3.2 Υφιστάμενες λύσεις στο πρόβλημα της χωρικής αξιολόγησης δικτύων

Μια ολοκληρωμένη πρόταση για χωροθέτηση γεωαισθητήρων πρέπει να συνοδεύεται και από έναν δείκτη, ο οποίος να τεκμηριώνει για το πόσο ικανοποιητική/αποδοτική είναι η προτεινόμενη λύση.

Όπως έχει πολλές φορές αναφερθεί το πρόβλημα χωροθέτησης γεωαισθητήρων είναι διττό. Σχετίζεται όχι μόνο με τη γεωγραφική/χωρική κάλυψη της περιοχής, αλλά και με την επίτευξη επαρκούς μεταξύ τους επικοινωνίας για τη μετάδοση του σήματος.

Στη βιβλιογραφία μπορεί να βρει κανείς πολλούς δείκτες αξιολόγησης που σχετίζονται με τη δικτυακή επικοινωνία μεταξύ των γεωαισθητήρων ή την κατανάλωση ενέργειας (Zhang & Zhou, 2012), (Wang & Medidi, 2007), (Vu & Li, 2009).

Παρόλ' αυτά οι δείκτες που αφορούν τη γεωγραφική κάλυψη είναι περιορισμένοι και τις περισσότερες φορές, μη επαρκείς. Βασίζονται στη σύγκριση της προτεινόμενης μεθοδολογίας με κάποιες άλλες υπάρχουσες, χωρίς να αποτελούν καθολικό μέτρο αξιολόγησης της γεωγραφικής κατανομής του δικτύου (Dagar & Saroha, 2013).

Χαρακτηριστική είναι η μεθοδολογία που προτείνεται στην εργασία "Delaunay triangulation as a new coverage measurement method in wireless sensor network" (Chizari, Hosseini, & Poston, 2011). Προσδιορίζεται το ποσοστό της έκτασης η οποία καλύπτεται σε σχέση με ολόκληρη την έκταση και οι αποστάσεις μεταξύ των αισθητήρων. Επιπλέον οι αισθητήρες διαχωρίζονται σε αυτούς που έχουν μεγάλο, επαρκή ή μικρό αριθμό άλλων αισθητήρων κοντά τους. Το ποσοστό της επιβλεπόμενης περιοχής χρησιμοποιείται ως δείκτης και από τους Vieira, Vieira, et al. Στις περιπτώσεις αυτές όμως δε δίνεται καμία πληροφορία για τα τμήματα που δεν έχουν καμία κάλυψη από αισθητήρα.

Στην ελληνική βιβλιογραφία χρησιμοποιείται ως δείκτης αξιολόγησης της χωροθέτησης, το ποσοστό των αισθητήρων που δεν χρειάζεται μετακίνηση σε σχέση με τις προκαθορισμένες (δεσμευμένες θέσεις). Όσο λιγότεροι

αισθητήρες πρέπει να μετακινηθούν, τόσο πιο ιδανική είναι η επιλογή των θέσεων εγκατάστασης (Κολεγά, 2014).

3.3 Εναλλακτικές μετρικές αξιολόγησης

Με τον όρο μετρική, νοείται το χαρακτηριστικό ή η παράμετρος με την οποία αξιολογείται η αποδοτικότητα ή η επίδοση της λύσης ενός προβλήματος.

Η επιλογή της κατάλληλης μετρικής είναι ιδιαίτερα κρίσιμη παράμετρος στην αξιολόγησης της λύσης, καθώς είναι αυτή που τελικά θα προκρίνει τη μία λύση έναντι της άλλης.

Μία λανθασμένη επιλογή μετρικής πιθανότατα θα οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα ως προς την αποδοτικότητα κάθε λύσης.

Καθόσον η λύση που προτείνεται είναι άμεσα συνδεδεμένη με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, και συγκεκριμένα το πλέγμα τριγώνων που δημιουργούν οι αισθητήρες προκειμένου να την καλύψουν, είναι εύλογο η επιλογή της μετρικής να αναζητηθεί, μεταξύ των ιδιοτήτων – γεωμετρικών χαρακτηριστικών των τριγώνων.

Παρακάτω προτείνονται και καταγράφονται διαφορετικές μετρικές και επιλέγεται η καταλληλότερη εξ' αυτών. Οι περισσότερες βασίζονται σε χαρακτηριστικά που απορρέουν από τη γεωμετρία των τριγώνων και τις σχέσεις που δημιουργούνται σε ένα πλέγμα τυχαίων τριγώνων. Κάθε μία από αυτές αναλύεται και καταγράφονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά της. Η λύση που τελικά επιλέγεται βασίζεται στη σύγκριση ενός τυχαίου και ενός κανονικού πλέγματος τριγώνων και αφορά στα μέτρα θέσης και διασποράς, όπως αυτά απορρέουν από την επιστήμη της στατιστικής.

3.3.1 Έλεγχος χωρικής κατανομής με το δείκτη Clark-Evans

Η επιστήμη της γεωγραφίας και της ανάλυσης χώρου και τα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών παρέχουν δείκτες αξιολόγησης μιας χωρικής κατανομής, όπως αυτή της χωροθέτησης γεωαισθητήρων.

Η χωρική διασπορά σημειακών κατανομών μπορεί να προσδιορισθεί από τον δείκτη D (Clark & Evans, 1955). Με το συγκεκριμένο δείκτη, δημιουργείται μια κλίμακα που αρχίζει από το ομαδοποιημένο και μέσω του τυχαίου καταλήγει στο ομοιόμορφο χωρικό πρότυπο (Κουτσόπουλος, 2002).

Ουσιαστικά συγκρίνεται η υφιστάμενη χωρική κατανομή σε σχέση με την θεωρητική κατανομή. Έστω περιοχή επιφάνειας A , η οποία περιέχει N σημεία.

Αν θεωρηθεί μια τυχαία χωρική διαδικασία, έχει αποδειχθεί ότι η πιθανότητα να υπάρχει ένα σημείο σε απόσταση d , ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή d_a που δίνεται από τη σχέση:

$$d_a = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{N/A} \quad (3.1)$$

Δεδομένου ότι η παρατηρούμενη μέση τιμή των αποστάσεων κάθε σημείου από τα πλησιέστερά του, δίνεται από τη σχέση:

$$d_\pi = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N d_i \quad (3.2)$$

Η τιμή αυτή είναι μια δειγματική τιμή της πιο πάνω θεωρητικής κατανομής. Ορίζεται ο δείκτης $D = d_\pi/d_a$. Οι τιμές της κλίμακας D , όπως είναι γνωστή, κυμαίνονται από 0 έως 2.149 (King, 1962).

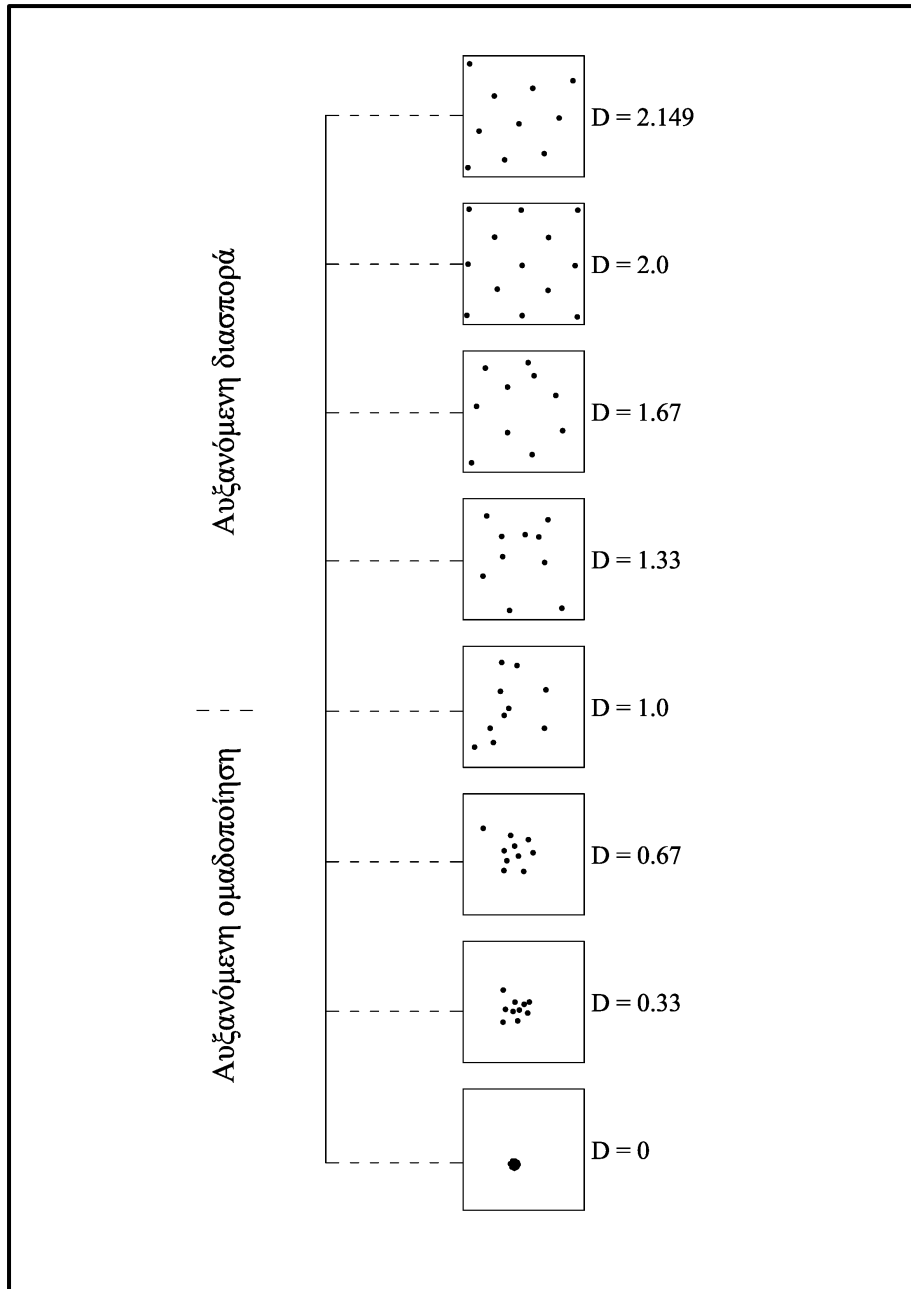
Όταν $D = 0$, τα σημεία βρίσκονται στην ίδια θέση (ομαδοποιημένο πρότυπο).

Όταν $D = 1$ τα σημεία βρίσκονται σε τυχαία χωρική κατανομή.

Τέλος υψηλές τιμές του D αντιπροσωπεύουν ποικίλους βαθμούς διασποράς. Η ακραία τιμή $D = 2.149$ αναφέρεται στο εξαγωνικό ομοιόμορφο χωρικό πρότυπο. (σχήμα 3.2)

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι ιδανική για να καταδείξει πόσο καλά η κατανομή των γεωαισθητήρων πλησιάζει την ιδανική τοποθέτηση (ισόπλευρα τρίγωνα), όμως έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα. Αποτελεί ένα συνολικό δείκτη της περιοχής μελέτης και συνεπώς αδυνατεί να καταδείξει σε ποιο σημείο της περιοχής υπάρχουν αδυναμίες και ελλείψεις, ώστε το συγκεκριμένο τμήμα να ενισχυθεί με επιπλέον γεωαισθητήρες.

Συνεπώς, η κατάλληλη μετρική πρέπει να αναζητηθεί και να βασιστεί σε γεωμετρικά, πρωτίστως, χαρακτηριστικά της υφιστάμενης χωροθέτησης.



Σχήμα 3.2: Η κλίμακα του D. (Taylor, 1977)

3.3.2 Εμβαδόν των τριγώνων

Με τη συγκεκριμένη μετρική, συγκρίνεται το εμβαδόν ισοπλεύρου τριγώνου, πλευράς R (όπου R το εύρος ανίχνευσης του αισθητήρα), με το εμβαδόν τυχαίου τριγώνου, όπως αυτό προκύπτει από τις συντεταγμένες (x, y) των κορυφών του (τύπος του Gauss):

$$E_{\text{ισοπλ.}} = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot R^2 \quad (3.3)$$

$$E_{\text{τυχαίου}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 (x_{i+1} - x_{i-1}) \cdot y_i \quad (3.4)$$

Η συγκεκριμένη μετρική κρίνεται ακατάλληλη για την αξιολόγηση της λύσης. Ένα τυχαίο τρίγωνο μπορεί να έχει ίδιο εμβαδόν με ένα ισόπλευρο πλευράς R , αλλά οι κορυφές του να είναι σε τέτοια θέση, ώστε να απέχουν κατά πολύ από την ιδανική γεωμετρία.

3.3.3 Περίμετρος των τριγώνων

Χρησιμοποιώντας τη συγκεκριμένη μετρική, ελέγχεται κατά πόσον η περίμετρος ενός τυχαίου τριγώνου πλευρών α, β, γ , προσεγγίζει το άθροισμα των πλευρών ενός ισοπλεύρου τριγώνου, πλευράς R , (ήτοι $3 \cdot R$).

$$\Pi_{\text{ισοπλ.}} = 3 \cdot R \quad (3.5)$$

$$\Pi_{\text{τυχαίου}} = \alpha + \beta + \gamma \quad (3.6)$$

Αντίστοιχα με την προηγούμενη περίπτωση το άθροισμα των πλευρών κρίνεται ακατάλληλο ως μετρική, καθώς ένα τυχαίο τρίγωνο μπορεί να έχει ίδιο άθροισμα με πλευρών με ένα αντίστοιχο ισόπλευρο, πλευράς R , αλλά και πάλι οι αποστάσεις τους να είναι απαγορευτικές για τη μεταξύ τους επικοινωνία και την ανίχνευση του φαινομένου στον μεταξύ αυτών χώρο.

3.3.4 Τυπική απόκλιση της μέσης τιμής των πλευρών του τριγώνου

Το γεγονός ότι το ισόπλευρο τρίγωνο αποτελείται από 3 πλευρές ίσες μεταξύ τους, δίνει άλλη μια ιδιότητα, χρησιμοποιώντας μέτρα διασποράς από την επιστήμη της στατιστικής. Η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής των πλευρών του, είναι ίση με μηδέν.

Πράγματι σε ισόπλευρο τρίγωνο πλευράς R (όπου R , το εύρος ανίχνευσης του αισθητήρα), ισχύει ότι η μέση τιμή της πλευράς είναι:

$$\hat{x} = \frac{R+R+R}{3} = R \quad (3.5)$$

Αντίστοιχα, η τυπική απόκλιση είναι:

$$\sigma_0 = \frac{\sqrt{[uu]}}{n-1} = \frac{0}{2} = 0 \quad (3.6)$$

Σε τυχαίο τρίγωνο, θα ισχύει:

$$\hat{\chi} = \frac{\alpha + \beta + \gamma}{3} \quad (3.7)$$

$$\sigma_0 = \frac{\sqrt{[uu]}}{n-1} \quad (3.8)$$

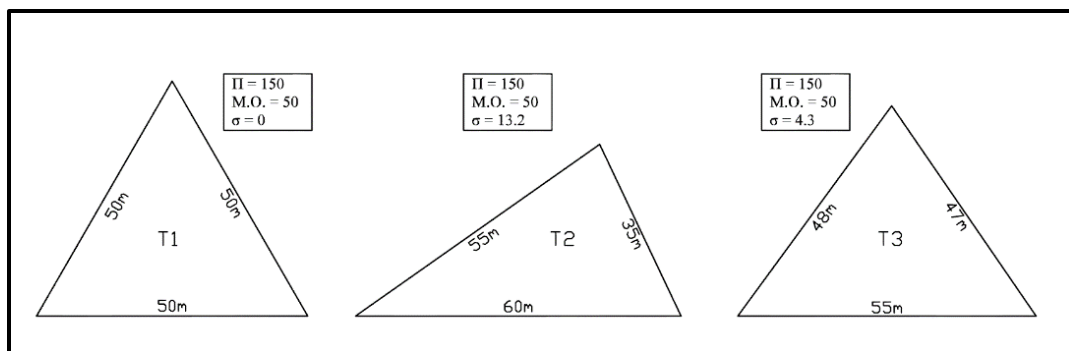
Όπου:

α, β, γ : το μέτρο των πλευρών του τριγώνου

u : η διαφορά κάθε πλευράς του τριγώνου, από τη μέση τιμή

$n = 3$: ο αριθμός των πλευρών του τριγώνου

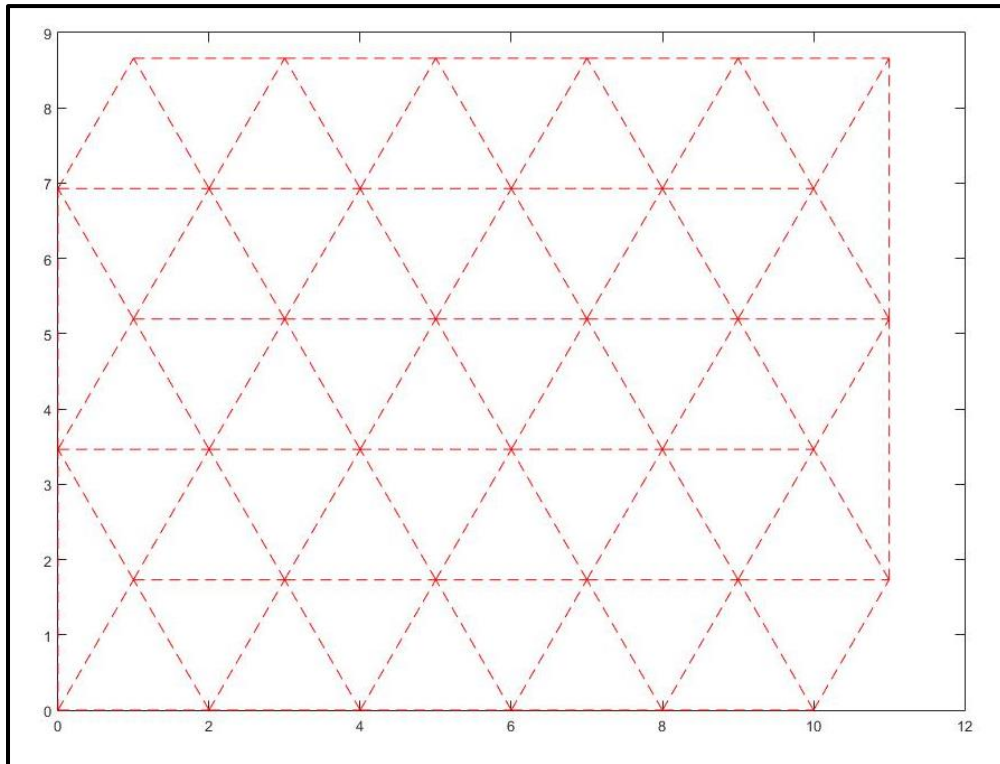
Χρησιμοποιώντας λοιπόν, την τυπική απόκλιση της μέσης τιμής των πλευρών ως μετρική σε ένα οποιοδήποτε τυχαίο τρίγωνο, προκύπτει πώς όσο πιο μικρή είναι η τυπική απόκλιση, τόσο περισσότερο αυτό θα προσεγγίζει το ισόπλευρο τρίγωνο. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.3 δύο τυχαία τρίγωνα μπορεί να έχουν την ίδια περίμετρο Π , ή/και την ίδια μέση τιμή πλευρών. Ακόμα και έτσι όμως, αυτό που προσεγγίζει καλύτερα το ισόπλευρο τρίγωνο είναι αυτό με την μικρότερη τυπική απόκλιση των πλευρών του.



Σχήμα 3.3: Σύγκριση της τυπικής απόκλισης πλευρών διαφόρων τριγώνων

3.3.4.1 Μέση τιμή της τυπικής απόκλισης πλέγματος τριγώνων

Ένας κανονικός τριγωνικός κানাβος, αποτελείται από ένα σύνολο ισόπλευρων τριγώνων, ίσων μεταξύ τους (σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4: Κανονικός τριγωνικός κάναβος

Βασιζόμενοι στην ιδιότητα που αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η μέση τιμή των τυπικών αποκλίσεων των μέσων τιμών των πλευρών των τριγώνων θα είναι ίση με μηδέν (καθώς όλες οι επιμέρους τιμές θα είναι ίσες με μηδέν).

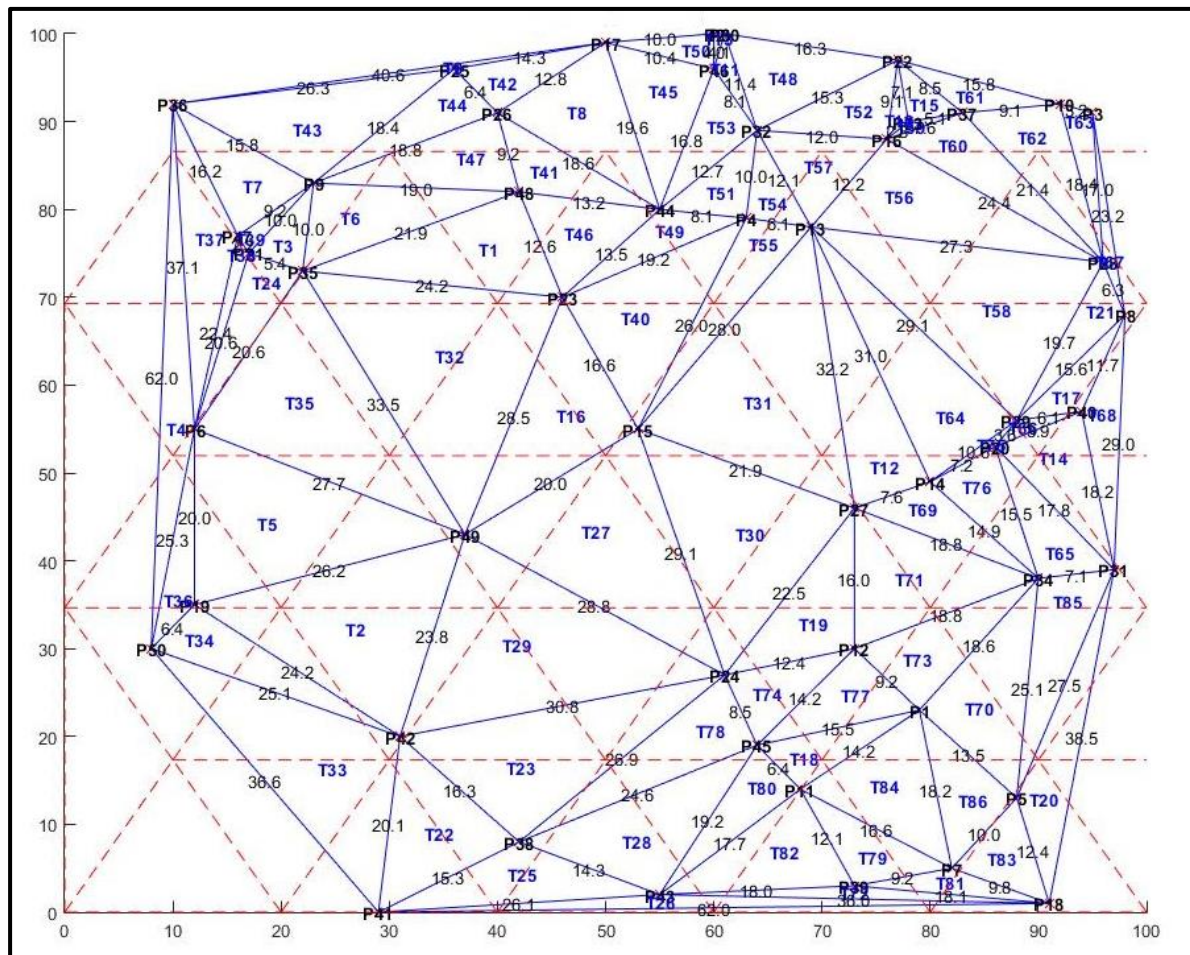
Έτσι ένας τριγωνισμός, ο οποίος έχει προκύψει από ένα τυχαίο σύνολο σημείων, μπορεί να συγκριθεί με τον κανονικό τριγωνικό κάναβο, χρησιμοποιώντας ως μετρική τη μέση τιμή, $\bar{\sigma}_0$, των τυπικών αποκλίσεων των πλευρών κάθε επιμέρους τριγώνου. Όσο μικρότερη τιμή λαμβάνει, τόσο περισσότερο ο τυχαίος τριγωνισμός θα προσεγγίζει τον ιδανικό.

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα της παραπάνω μετρικής είναι ότι δεν επηρεάζεται καθόλου από τη μετατόπιση ή τη στροφή που ενδεχομένως έχει το πλέγμα των ακανόνιστων τριγώνων σε σχέση με τον κανονικό κάναβο και εξαρτάται μόνο από το μέγεθος της πλευράς κάθε τριγώνου. Δηλαδή, η γεωμετρία που σχηματίζει το τυχαίο πλέγμα τριγώνων, συγκρίνεται με τη γεωμετρία που σχηματίζει ο κανονικός τριγωνικός κάναβος (σχήμα 3.5).

Ταυτόχρονα με τον υπολογισμό της μέσης τιμής της τυπικής απόκλισης του πλέγματος, ενδιαφέρον παρουσιάζουν και άλλοι τρεις στατιστικοί δείκτες: η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή μεταξύ των τυπικών αποκλίσεων. Η ελάχιστη τιμή είναι επιθυμητό να βρίσκεται κοντά στο μηδέν. Αντίστοιχα μια υψηλή μέγιστη τιμή, δείχνει ότι υπάρχουν τρίγωνα στο πλέγμα τα οποία δημιουργούν κακή

γεωμετρία. Τέλος, χρήσιμα συμπεράσματα προκύπτουν και από τη μελέτη της διαμέσου (median) των τυπικών αποκλίσεων. Υπενθυμίζεται ότι διάμεσος ενός συνόλου αριθμών, είναι ο αριθμός ο οποίος είναι μεγαλύτερος ή ίσος από το 50% των αριθμών του συνόλου και μεγαλύτερος ή ίσος από το 50% των αριθμών του συνόλου. (Bolstad, 2007).

Τέλος, πρέπει να μελετάται και το ιστόγραμμα συχνοτήτων των τυπικών αποκλίσεων. Όσο περισσότερες τιμές τυπικών αποκλίσεων συγκεντρώνονται σε χαμηλές τιμές, τόσο πιο πολύ ολόκληρο το πλέγμα πλησιάζει το κανονικό τριγωνικό. Σε κάθε περίπτωση, οι κλάσεις στις οποίες χωρίζεται το ιστόγραμμα πρέπει να είναι ανάλογες του αριθμού των τριγώνων που δημιουργούνται.



Σχήμα 3.5: Επικάλυψη κανονικού τριγωνικού κανάβου με TIN

3.3.4.2 Ο δείκτης g

Η χρήση της μέσης τιμής των τυπικών αποκλίσεων των πλευρών κάθε τριγώνου, δίνει χρήσιμα συμπεράσματα για το πόσο καλά προσαρμόζονται τα τρίγωνα που σχηματίζονται, στον κανονικό τριγωνικό κানাβο. Έτσι όταν αυξάνεται ή μειώνεται ο αριθμός των τριγώνων, η τιμή αυτή μεταβάλλεται και τα αποτελέσματα είναι άμεσα συγκρίσιμα μεταξύ τους.

Το πρόβλημα παρουσιάζεται όταν συγκρίνονται σενάρια τα οποία αφορούν σε διαφορετική ακτίνα εμβέλειας. Είναι εύλογο όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα εμβέλειας κάθε αισθητήρα, οι τυπικές αποκλίσεις των πλευρών των τριγώνων να παίρνουν και μεγαλύτερες τιμές.

Αντίθετα, σε δύο σενάρια όπου $R_{1,s} = 50m$ και $R_{2,s} = 20m$ όπου $\overline{\sigma_{1,0}} = \overline{\sigma_{2,0}} = 2 m$, η τυπική απόκλιση δείχνει καλύτερη προσαρμογή στην πρώτη περίπτωση απ' ότι στη δεύτερη.

Έτσι, προτείνεται, όταν πρόκειται να συγκρίνονται σενάρια με αισθητήρες διαφορετικής εμβέλειας να χρησιμοποιείται ο δείκτης:

$$g = \overline{\sigma_0}/R_s \quad (3.9)$$

Προφανώς όσο πιο κοντά στο μηδέν είναι οι τιμές του δείκτη, τόσο καλύτερη προσαρμογή έχει επιτευχθεί.

3.3.5 Σύγκριση εναλλακτικών μετρικών

Όπως και στην περίπτωση των τοπολογιών, έτσι και στην περίπτωση των διαφορετικών μετρικών, η καταγραφή τους, βοηθάει στην κατανόηση των συγκριτικών πλεονεκτημάτων κάθε μιας, έναντι των υπολοίπων και στην επιλογή της καταλληλότερης και πιο αντιπροσωπευτικής, για τα δεδομένα του προς επίλυση προβλήματος.

Ως εκ τούτου χρησιμοποιείται και πάλι η μέθοδος της πολυκριτηριακής ανάλυσης/αξιολόγησης. Τα βασικά κριτήρια ως προς τα οποία αξιολογούνται οι εναλλακτικές μετρικές είναι:

- Η ευκολία υλοποίησης/προγραμματισμού
- Η αντιπροσωπευτικότητα του δείκτη στη μοναδικότητα της λύσης
- Εστίαση στα τρίγωνα που παρουσιάζουν πρόβλημα

Ως προς τη βαθμολογία επιλέχθηκε και πάλι η κλίμακα 1-5, με το 1 να αντιστοιχεί στον μικρότερο βαθμό ικανοποίησης του κριτηρίου και το 5 στον

μεγαλύτερο. Η βαθμολόγηση πραγματοποιήθηκε με βάση τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε μετρικής, όπως αυτά περιγράφησαν παραπάνω.

Όπως προκύπτει από τον πίνακα 3.1, αλλά και από την ανάλυση που προηγήθηκε η πλέον ενδεδειγμένη μετρική είναι ο δείκτης g .

Μετρική	Κριτήρια			
	Ευκολία υλοποίησης	Αντιπροσωπευτικότητα	Εστίαση στα τρίγωνα κακής γεωμετρίας	Σύνολο
Δείκτης Clark-Evans	2	5	1	8
Εμβαδόν τριγώνων	5	1	3	9
Περίμετρος τριγώνων	5	1	3	9
Μέση τιμή τυπικής απόκλισης πλέγματος	3	4	5	12
$g = \overline{\sigma_0}/R_s$	3	5	5	13

Πίνακας 3.1: Αξιολόγηση προτεινόμενων μετρικών

Παρόλ' αυτά κατά τη διαδικασία αξιολόγησης, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και η μέση τιμή των τυπικών αποκλίσεων των τριγώνων του πλέγματος, καθώς και η ελάχιστη και μέγιστη τιμή των τυπικών αποκλίσεων, αλλά και το ιστόγραμμα των τυπικών αποκλίσεων στο σύνολό τους. Η ορθή ερμηνεία τους, συνδυαστικά είναι αυτή που θα οδηγεί στην λήψη της απόφασης για αποδοχή της συγκεκριμένης λύσης ή στην ανατροφοδότηση του συστήματος με νέες παραμέτρους για την δημιουργία εναλλακτικού σεναρίου.

3.4 Τριγωνισμοί σημείων στο επίπεδο

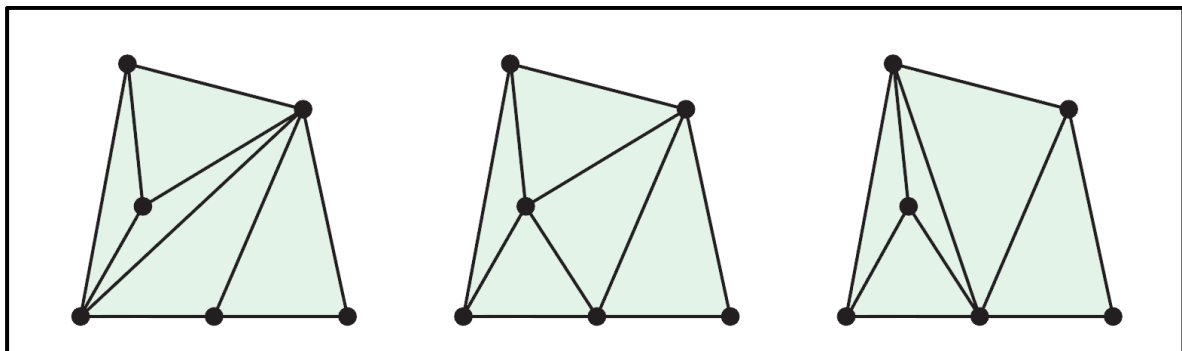
Μετά την επιλογή της κατάλληλης μετρικής, γίνεται σαφές ότι ο αλγόριθμος αξιολόγησης θα βασιστεί στην τριγωνοποίηση του συνόλου των σημείων, τα οποία αντιστοιχούν στις τελικές θέσεις τοποθέτησης αισθητήρων. Ο τριγωνισμός Delaunay αποτελεί έναν τριγωνισμό ενός συνόλου σημείων στο επίπεδο, ο οποίος πληροί συγκεκριμένες ιδιότητες. Προκειμένου να γίνουν περισσότερο κατανοητές οι ιδιότητες αυτές, παρακάτω δίνονται ορισμένα στοιχεία από τη θεωρία των τριγωνισμών.

3.4.1 Τριγωνισμός συνόλου σημείων

Έστω $P := \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ ένα σύνολο σημείων στο επίπεδο. Για να ορισθεί τυπικά ένας τριγωνισμός του P , ορίζεται αρχικά ως *μεγιστιαία επίπεδη υποδιαίρεση* μια υποδιαίρεση S , στην οποία δεν μπορεί να προστεθεί καμία ακμή που συνδέει δύο κορυφές χωρίς να καταστραφεί η επιπεδότητα. Διαφορετικά, κάθε ακμή που δεν ανήκει στην S , τέμνει κάποια από τις υπάρχουσες ακμές.

Ορίζεται ως τριγωνισμός του P μια μεγιστιαία επίπεδη υποδιαίρεση η οποία έχει σύνολο κορυφών το P . (de Berg, Cheong, van Kreveld, & Overmars, 2008)

Ένας ορισμός διαφορετικά διατυπωμένος δίνεται από τους Devadoss & O'Rourke, 2011: **Τριγωνισμός ενός συνόλου σημείων P , στις δύο διαστάσεις, είναι μια υποδιαίρεση του επιπέδου που καθορίζεται από ένα μέγιστο σύνολο μη τεμνόμενων ακμών, των οποίων οι κορυφές ανήκουν στο σύνολο P** (σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6: Τριγωνισμοί του ίδιου σημειοσυνόλου (Devadoss & O'Rourke, 2011)

Το πλήθος των τριγώνων, όπως και το πλήθος των ακμών είναι ίδιο σε κάθε τριγωνισμό του P . Ο αριθμός και των δύο εξαρτάται από το πλήθος των σημείων του P που βρίσκονται επάνω στο σύνορο του κυρτού περιβλήματος του P .

Έστω \mathcal{T} ένας τριγωνισμός του P , ο οποίος περιλαμβάνει m τρίγωνα και οι $3m$ γωνίες των τριγώνων του \mathcal{T} είναι διατεταγμένες σε αύξουσα σειρά.

Έστω $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{3m}$, η αντίστοιχη ακολουθία γωνιών,

Όπου: $\alpha_i \leq \alpha_j$, για $i < j$

Ορίζεται ως *γωνιοδιάνυσμα*⁴ του \mathcal{T} το διάνυσμα:

⁴ Το διάνυσμα το οποίο περιέχει τις γωνίες των τριγώνων του τριγωνισμού \mathcal{T} , διατεταγμένες κατ' αύξουσα σειρά.

$$A(\mathcal{T}) := (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{3m}) \quad (3.10)$$

Έστω \mathcal{T}' ένας άλλος τριγωνισμός του ίδιου συνόλου P , και το αντίστοιχο γωνιοδιάνυσμά του $A(\mathcal{T}') := (a'_1, a'_2, \dots, a'_{3m})$

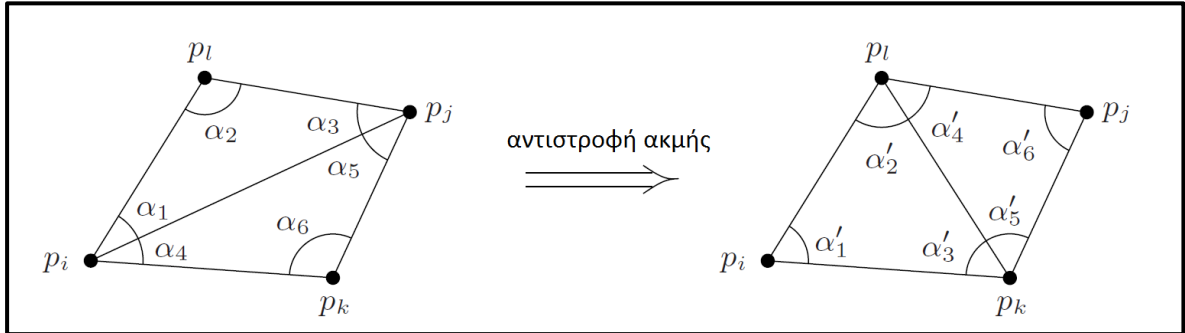
Το γωνιοδιάνυσμα $A(\mathcal{T})$ του \mathcal{T} είναι μεγαλύτερο από το γωνιοδιάνυσμα $A(\mathcal{T}')$ του \mathcal{T}' , αν υπάρχει κάποιο i στο διάστημα $1 \leq i \leq 3m$ τέτοιο ώστε:

$$\alpha_j \leq a'_j, \forall j < i \text{ και } \alpha_i > a'_i \quad (3.11)$$

Η παραπάνω σχέση συμβολίζεται ως $A(\mathcal{T}) > A(\mathcal{T}')$. Ένας τριγωνισμός λέγεται γωνιακά βέλτιστος αν $A(\mathcal{T}) \geq A(\mathcal{T}')$ για κάθε τριγωνισμό \mathcal{T}' του P .

Οι τριγωνισμοί που είναι γωνιακά βέλτιστοι είναι ιδιαίτερα σημαντικοί καθώς, ενδείκνυνται για την κατασκευή ή προσομοίωση ενός αναγλύφου από ένα σύνολο σημείων.

Έστω μια ακμή $e = \overline{p_i p_j}$, ενός τριγωνισμού \mathcal{T} του P . Όταν η e δεν είναι ακμή του εξωτερικού ορίου τότε ανήκει σε δύο τρίγωνα $p_i p_j p_k$ και $p_i p_j p_l$. Αν τα τρίγωνα σχηματίζουν κυρτό τετράπλευρο, μπορεί να δημιουργηθεί ένας καινούριος τριγωνισμός \mathcal{T}' αφαιρώντας από τον \mathcal{T} την $e = \overline{p_i p_j}$ και αντικαθιστώντας την με την $e = \overline{p_k p_l}$. Η διαδικασία λέγεται αντιστροφή ακμής (σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7: Αντιστροφή μη επιτρεπτής ακμής (de Berg, Cheong, van Kreveld, & Overmars, 2008)

Η διαφορά στα γωνιοδιανύσματα του \mathcal{T} και του \mathcal{T}' , είναι οι γωνίες $\alpha_1, \dots, \alpha_6$ του $A(\mathcal{T})$, που έχουν αντικατασταθεί από τις γωνίες $\alpha'_1, \dots, \alpha'_6$ στον $A(\mathcal{T}')$. Σε έναν τριγωνισμό, η ακμή $e = \overline{p_i p_j}$ λέγεται μη επιτρεπτή αν:

$$\min_{1 \leq i \leq 6} \alpha_i < \min_{1 \leq i \leq 6} \alpha'_i \quad (3.12)$$

Διαφορετικά, μια ακμή είναι μη επιτρεπτή αν αντιστρέφοντάς την, μπορεί να αυξηθεί τοπικά η ελάχιστη γωνία.

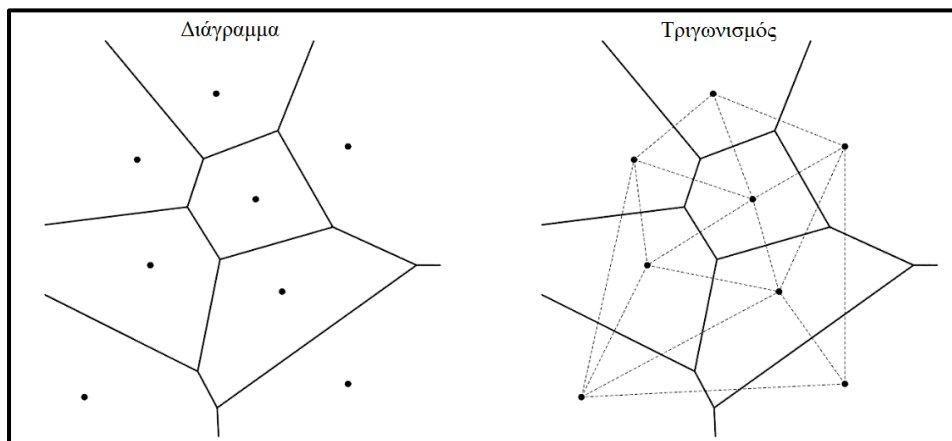
Κάθε τριγωνισμός που δεν περιέχει μη επιτρεπτές ακμές, ονομάζεται επιτρεπτός τριγωνισμός και μπορεί να προκύψει με πεπερασμένο αριθμό αντιστροφών από κάποιον αρχικό τριγωνισμό. Επιπλέον κάθε βέλτιστος τριγωνισμός είναι και επιτρεπτός (de Berg, Cheong, van Kreveld, & Overmars, 2008).

3.4.2 Τριγωνισμός Delaunay

Όπως έχει αναφερθεί στα προηγούμενα, ο τριγωνισμός Delaunay αποτελεί μια ειδική περίπτωση τριγωνισμού και είναι το δυικό πρόβλημα των πολυγώνων Voronoi. Πήρε το όνομα του από τον Ρώσο μαθηματικό Boris Nikolaevich Delaunay, μετά την έρευνα του στο αντικείμενο το 1934 (de Berg, Cheong, van Kreveld, & Overmars, 2008).

Έστω P , ένα σύνολο σημείων στο επίπεδο. Ο τριγωνισμός Delaunay αποτελεί βέλτιστο και επιτρεπτό τριγωνισμό καθώς μεγιστοποιεί την ελάχιστη γωνία, σε σχέση με όλους τους τριγωνισμούς του P . Αντίστροφα, ένας τριγωνισμός \mathcal{T} , του P , είναι επιτρεπτός μόνο εάν είναι τριγωνισμός Delaunay.

Βασικό χαρακτηριστικό των τριγωνισμών Delaunay είναι ότι κανένα σημείο του P , δεν βρίσκεται στο εσωτερικό του περιγεγραμμένου κύκλου κάποιου από τα τρίγωνα που σχηματίζονται (σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.8: Διάγραμμα Voronoi και ο αντίστοιχος τριγωνισμός Delaunay

Σε αντιστοιχία με τα πολύγωνα Voronoi (υπενθυμίζεται ότι ο τριγωνισμός Delaunay αποτελεί το δυικό πρόβλημα):

- Τρία σημεία $p_i, p_j, p_k \in P$, αποτελούν κορυφές του ίδιου τριγώνου του γραφήματος Delaunay του P , αν και μόνο αν ο κύκλος που διέρχεται από τα p_i, p_j, p_k , δεν περιέχει στο εσωτερικό του κανένα σημείο του P .

- Κάθε ακμή Voronoi, αντιστοιχεί σε μια ακμή Delaunay, που ορίζεται από τις δύο εστίες Voronoi. Οι δύο ακμές είναι κάθετες μεταξύ τους.

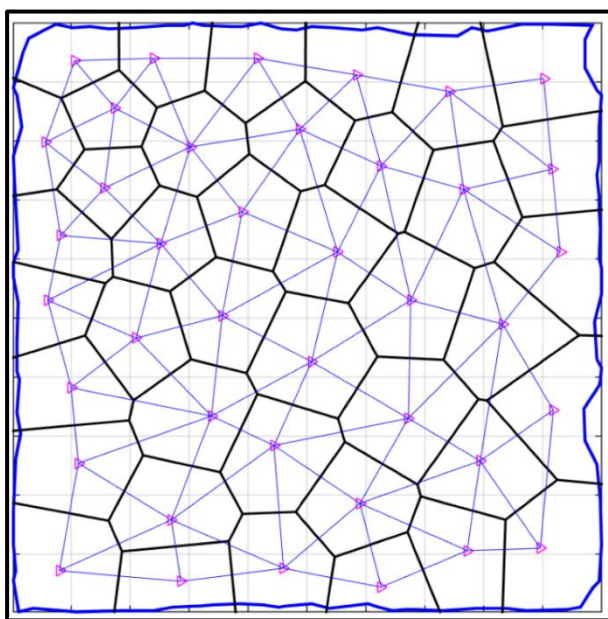
Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι προσδιορισμού του τριγωνισμού Delaunay. Οι πιο χαρακτηριστικοί εξ' αυτών είναι:

- οι αλγόριθμοι αντιστροφής
- οι αυξητικοί αλγόριθμοι
- οι αλγόριθμοι “divide and conquer” και ο αλγόριθμος sweep hull. (Cormen, Leiserson, Rivest, & Stein, 2009), (de Oliveira, 2012).

3.5 Ο αλγόριθμος αξιολόγησης

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ο τριγωνισμός Delaunay αποτελεί τη βάση για την αξιολόγηση της χωροθέτησης του δικτύου γεωαισθητήρων. Στην παρούσα παράγραφο αναλύεται η προτεινόμενη μεθοδολογία, ενώ στο κεφάλαιο 4, παρατίθενται αναλυτικά πίνακες, στατιστικά και σχήματα από το λογισμικό το οποίο συντάχθηκε για το σκοπό αυτό.

Μοναδική παράμετρος εισόδου αποτελούν οι συντεταγμένες των σημείων που έχουν επιλεγεί για την τοποθέτηση των γεωαισθητήρων. Για τα σημεία αυτά, δημιουργείται ο αντίστοιχος τριγωνισμός Delaunay. Δεδομένου ότι ο τριγωνισμός Delaunay συνδέεται άμεσα με τα πολύγωνα Voronoi, όσο πιο ομοιόμορφα σχήματα (κανονικά εξάγωνα) έχουν δημιουργηθεί κατά το στάδιο της χωροθέτησης, τόσο περισσότερα τα τρίγωνα που θα δημιουργηθούν κατά το στάδιο αυτό θα πλησιάζουν τα ισόπλευρα (σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.9: CVT και τριγωνισμός Delaunay στις θέσεις εγκατάστασης

Σε κάθε τρίγωνο που δημιουργείται, αντιστοιχίζονται τα τρία σημεία που το απαρτίζουν (θέσεις τοποθέτησης) και τα αντίστοιχα μήκη πλευρών. Επιπλέον υπολογίζεται η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής των πλευρών κάθε τριγώνου. Τόσο τα μήκη των πλευρών των τριγώνων, όσο και οι τυπικές αποκλίσεις της μέσης τιμής των πλευρών αποθηκεύονται σε πίνακες.

Ο χρήστης είναι δυνατόν να ανατρέξει σε αυτές και να εντοπίσει αν υπάρχουν μη επιθυμητές τιμές πλευρών ή τρίγωνα με μεγάλες τιμές τυπικών αποκλίσεων (π.χ. τρίγωνα που δημιουργούνται στο εξωτερικό όριο της περιοχής μελέτης).

Έτσι είναι δυνατόν να επέμβει με μη αυτοματοποιημένη διαδικασία και να τοποθετηθούν αισθητήρες, για τη βελτίωση της γεωμετρίας τοπικά.

Τέλος υπολογίζεται η μέση τιμή όλων των τυπικών αποκλίσεων των τριγώνων και ο δείκτης g . Η τιμή αυτή αποτελεί και τη μετρική του προβλήματος και είναι αυτή που συγκρίνεται για κάθε ένα από τα σενάρια που δημιουργούνται.

Αν κρίνεται μη ικανοποιητική, επανακαθορίζονται οι παράμετροι του αρχικού προβλήματος (αριθμός αισθητήρων, εμβέλεια αισθητήρων) και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Επιπλέον χρησιμοποιούνται και άλλοι στατιστικοί δείκτες, όπως η διάμεσος, η μέγιστη και ελάχιστη τυπική απόκλιση της μέσης τιμής των πλευρών των σχεδιασμένων τριγώνων.

3.6 Ανάλυση ευαισθησίας

Όλα τα προβλήματα εγκατάστασης δικτύων περιλαμβάνουν μια παράμετρο η οποία μέχρι στιγμή στιγμή δεν έχει ληφθεί υπόψη και δεν είναι άλλη από τον παράγοντα των διαθέσιμων οικονομικών πόρων. Αν δεν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι οι οικονομικοί πόροι είναι πεπερασμένοι, θα μπορούσε να εγκατασταθεί ανεξέλεγκτα μεγάλος αριθμός αισθητήρων. Παρόλ' αυτά σε κάθε οικονομοτεχνικό πρόβλημα, το επιθυμητό είναι η μεγιστοποίηση του αποτελέσματος με όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος.

Υπάρχει κάποιο όριο που η προσθήκη επιπλέον αριθμού αισθητήρων, δεν συνεισφέρει στη λύση, βελτιώνοντας την ποιότητα της γεωμετρίας.

Η μοντελοποίηση οποιουδήποτε προβλήματος, πρέπει να λαμβάνει υπόψη, ότι το περιβάλλον μέσα στο οποίο μελετάται η εφαρμογή είναι δυναμικό και μπορούν να διαφοροποιηθούν οι τιμές πολλών μεταβλητών.

Ο αριθμός των αισθητήρων μπορεί να αλλάξει, το βεληνεκές των αισθητήρων μπορεί να μεταβληθεί, η ακτίνα μέσα στην οποία θα αναζητηθούν υπαρκτές θέσεις αισθητήρων μπορεί να μεγαλώσει ή να μικρύνει.

Συνεπώς, μαζί με την εύρεση της βέλτιστης λύσης, κρίσιμης σημασίας είναι και η δυνατότητα διερεύνησης σεναρίων που αφορούν στη φύση και στην έκταση των μεταβολών για εκείνες τις παραμέτρους του μοντέλου, οι οποίες μπορούν να ανατρέψουν την άριστη απόφαση (Pannell, 1996).

Αυξάνοντας, για παράδειγμα, κατά έναν τον αριθμό των αισθητήρων, προκύπτει κάθε φορά μια εντελώς νέα, διαφορετική λύση χωροθέτησης αυτών. Αυτό συνεπάγεται ότι κάθε φορά δημιουργείται διαφορετικός τριγωνισμός Delaunay.

Η αξιολόγηση της εκάστοτε λύσης κάθε φορά, παρουσιάζει κατά πόσον αυτή βελτιώνεται – και σε τι βαθμό – αυξάνοντας τον αριθμό των γεωαισθητήρων. Ο χρήστης καλείται να αποφασίσει μέχρι ποιόν αριθμό μπορεί να αυξήσει τον αριθμό τους, διατηρώντας σε κάθε περίπτωση τον υπολογισθέντα προϋπολογισμό εντός επιτρεπών ορίων.

Η ανάλυση ευαισθησίας μελετά τις συνέπειες που υφίσταται η ιδανική λύση ενός μοντέλου, ως συνέπεια αλλαγών στις τιμές των παραμέτρων του. Με άλλα λόγια διερευνάται κατά πόσον μεταβάλλεται η ποιότητα μιας λύσης μεταβάλλοντας κατά μία μονάδα κάποια από τις μεταβλητές, διατηρώντας όλες τις άλλες σταθερές (Saltelli, 2002), (Τσάντας, 2007).

Σε κάθε περίπτωση οι προτεινόμενες μεθοδολογίες απαιτούν διαδοχικές δοκιμές, κρατώντας κάθε φορά όλες τις μεταβλητές σταθερές, εκτός από μία, δημιουργώντας διαφορετικά σενάρια. Η αξιολόγηση κάθε σεναρίου θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και τελικά να επιλέγεται η οικονομικότερη κάθε φορά λύση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Λογισμικό χωροθέτησης και γεωμετρικής αξιολόγησης ασύρματων δικτύων γεωαισθητήρων

4.1 Γενικά

Η διαδικασία χωροθέτησης του ασύρματου δικτύου αισθητήρων (WSN) ή γεωαισθητήρων (GSN) και η αξιολόγηση της απαιτεί διαδικασίες, επαναλήψεις και υποπρογράμματα, οι οποίες είναι αδύνατον να υλοποιηθούν χωρίς την ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού. Επιπλέον η διαχείριση μεγάλου όγκου σημειακών, γραμμικών και επιφανειακών δεδομένων, καθιστά επιτακτική την ανάγκη επεξεργασίας και αποθήκευσής τους με μορφή πινάκων και απεικόνισής τους σε γραφικό περιβάλλον.

Για την αξιόπιστη και γρήγορη εξαγωγή των αποτελεσμάτων της χωροθέτησης και την αξιολόγηση της λύσης, στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής, υλοποιήθηκε κατάλληλο λογισμικό, αυτοματοποίησης της διαδικασίας.

Οι προτεινόμενες διαδικασίες υλοποιήθηκαν με τη δημιουργία – σύνταξη κατάλληλου λογισμικού, σε περιβάλλον Matlab.

4.2 Το ολοκληρωμένο μαθηματικό λογισμικό Matlab

Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών έδωσε δυνατότητα σύνταξης όλο και πιο πολύπλοκων και ευέλικτων λογισμικών, αλλά και απεικόνισής τους σε γραφικό περιβάλλον.

Το MATLAB (<http://www.mathworks.com/>, 2016) είναι ένα εύχρηστο και ευέλικτο μαθηματικό πακέτο για υψηλής απόδοσης αριθμητικούς υπολογισμούς (numerical computations).

Παρέχει στο χρήστη ένα διαδραστικό περιβάλλον με πλήθος ενσωματωμένες συναρτήσεις, κατάλληλες για την υλοποίηση απαιτητικών υπολογιστικών αναλύσεων, γραφημάτων καθώς επίσης και για την παραγωγή διαφόρων animations. Επιπλέον, προσφέρει τη δυνατότητα επέκτασης σε ποικίλα πεδία εφαρμογών με την αξιοποίηση της υψηλού επιπέδου γλώσσας προγραμματισμού, που διαθέτει.

Αποτελεί ένα εξελιγμένο υπολογιστικό εργαλείο, το οποίο βρίσκει εφαρμογή σε διάφορους τομείς της επιστήμης, όπως για παράδειγμα τη μηχανική, την ιατρική, τις θετικές επιστήμες, την οικονομία καθώς και γενικά

τη βιομηχανική παραγωγή. Το φάσμα των εφαρμογών του διευρύνεται συνεχώς, αναδεικνύοντας με αυτό τον τρόπο τις πολλαπλές δυνατότητες του, όπως:

- Υψηλή απόδοση και ταχύτητα υπολογιστικών αναλύσεων
- Δυνατότητα προσομοίωσης φυσικών συστημάτων
- Δυνατότητα υλοποίησης αλγορίθμων
- Δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας με πληθώρα άλλων προγραμμάτων και εφαρμογών
- Υψηλής ποιότητας γραφικές απεικονίσεις και animations
- Δυνατότητα σύνδεσης με διάφορες συσκευές καταγραφής
- Φιλικότητα προς το χρήστη και διαδραστικό χαρακτήρα

Οι ενσωματωμένες συναρτήσεις του λογισμικού, παρέχουν τα απαραίτητα σύνολα εργαλείων για υπολογισμούς γραμμικής άλγεβρας, ανάλυσης δεδομένων, επεξεργασία σημάτων κ.α.. Οι περισσότερες από τις προαναφερόμενες συναρτήσεις εφαρμόζουν την πλέον πρόσφατη και εξελιγμένη γνώση (state-of-the-art algorithms).

Επιπλέον ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αναπτύξει τις δικές του συναρτήσεις, χρησιμοποιώντας τη δική του γλώσσα προγραμματισμού. Από τη στιγμή που θα αναπτυχθούν οι συναρτήσεις αυτές, λειτουργούν ως ενσωματωμένες συναρτήσεις του εν λόγω λογισμικού.

Επίσης παρέχονται από το MATLAB πολλές προαιρετικές εργαλειοθήκες, οι οποίες προορίζονται για την ανάπτυξη ειδικών εφαρμογών, όπως συμβολικοί υπολογισμοί (symbolic computation), επεξεργασία εικόνων (image processing), στατιστική (statistics), σχεδιασμός ελέγχου συστημάτων (control system design), νευρωνικά δίκτυα (neural networks), ασαφή λογική (fuzzy logic). Η λίστα με τις διαθέσιμες εργαλειοθήκες συνεχώς διευρύνεται και σήμερα έχει ξεπεράσει τις 50 (Gilat, 2011), (Κατσάνος, 2008).

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα του Matlab, είναι η δυνατότητα που παρέχει, ώστε ο κώδικας που συντάσσεται να ενσωματώνεται σε παραθυρικό περιβάλλον με δυνατότητα απεικόνισης πινάκων, γραφικών, μενού εντολών κ.α., χρησιμοποιώντας το εργαλείο graphical user interface (GUI) που διαθέτει (Laint, 2013).

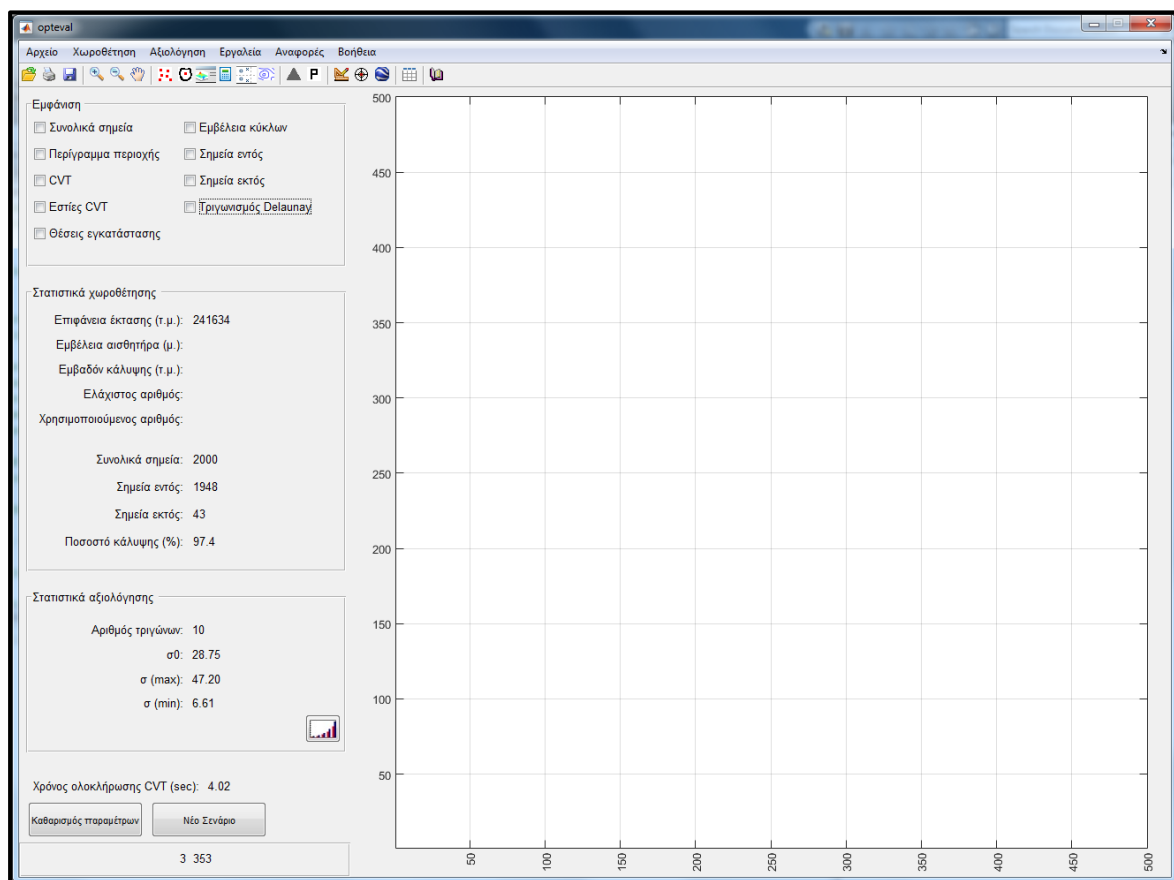
Επιπλέον παρέχει τη δυνατότητα για μετατροπή του τελικού προγράμματος σε εκτελέσιμο αρχείο (.exe file), ώστε να «τρέχει» αυτόνομα, χωρίς την απαίτηση εγκατάστασής του στον εκάστοτε υπολογιστή.

Συμπερασματικά, οι δυνατότητες και η ευελιξία που παρέχει κατά τη σύνταξη του κώδικα, οδήγησαν στην επιλογή του Matlab για τη δημιουργία του απαραίτητου λογισμικού, που αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της προτεινόμενης μεθοδολογίας που αναπτύσσεται στην παρούσα διδακτορική διατριβή.

4.3 Λογισμικό OptEval

Το λογισμικό OptEval (Optimization – Evaluation) δομήθηκε στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής, προκειμένου να συνεισφέρει στην ολοκληρωμένη και αυτοματοποιημένη διαδικασία της χωροθέτησης και αξιολόγησης ενός δικτύου αισθητήρων. Παρόλο που η εφαρμογή έχει αναπτυχθεί για το σκοπό αυτό, μπορεί κατ' επέκταση να χρησιμοποιηθεί και σε οποιοδήποτε αντίστοιχο πρόβλημα χωροθέτησης με ή χωρίς περιορισμούς.

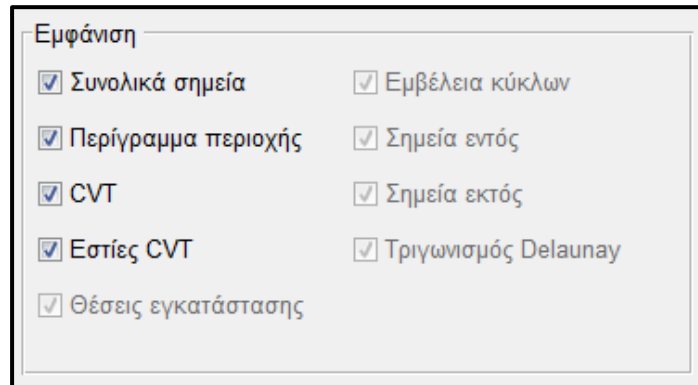
Η βασική οθόνη του προγράμματος αποτελείται από δύο μέρη (σχήμα 4.1). Στη δεξιά πλευρά βρίσκεται το πλαίσιο των γραφικών. Εκεί απεικονίζονται όλα τα διανυσματικά δεδομένα που προκύπτουν κατά τη διαδικασία (σημεία, γραμμές, πολύγωνα).



Σχήμα 4.1: Βασική οθόνη του λογισμικού OptEval

Στο αριστερό τμήμα υπάρχουν τρία πλαίσια. Το πρώτο (Εμφάνιση), παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα να επιλέγει ποια δεδομένα επιθυμεί κάθε φορά να εμφανίζονται στην οθόνη των γραφικών.

Κατά την εκκίνηση όλες οι επιλογές είναι ανενεργές, καθώς ακόμα δεν έχουν εισαχθεί στοιχεία. Έχει δομηθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε καθώς ο χρήστης εισάγει σταδιακά δεδομένα και από αυτά υπολογίζονται άλλα στοιχεία, να ενεργοποιούνται οι αντίστοιχες επιλογές (σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2: Επιλογές εμφάνισης στο πλαίσιο γραφικών

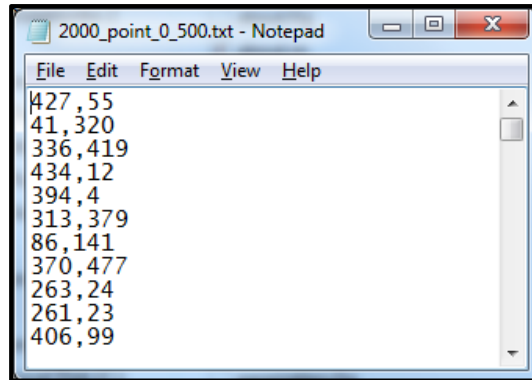
Τα υπόλοιπα δύο πλαίσια (στατιστικά χωροθέτησης και στατιστικά αξιολόγησης), ενημερώνονται επίσης όσο εξελίσσεται η διαδικασία με διάφορες χρήσιμες πληροφορίες και στατιστικά για το χρήστη.

Τέλος υπάρχουν και βοηθητικές λειτουργίες, όπως η αναγραφή των συντεταγμένων, καθώς ο χρήστης περιηγείται στην οθόνη των γραφικών και χρονόμετρο για την αναγραφή του χρόνου υλοποίησης της κατασκευής CVT σε κάθε σενάριο.

Ο χρήστης μπορεί να πραγματοποιήσει την εκτέλεση των λειτουργιών, είτε από τις επιλογές στο μενού στο επάνω τμήμα του προγράμματος, είτε από τα αντίστοιχα κουμπιά στη γραμμή εργαλείων.

4.3.1 Διαδικασία χωροθέτησης δικτύου

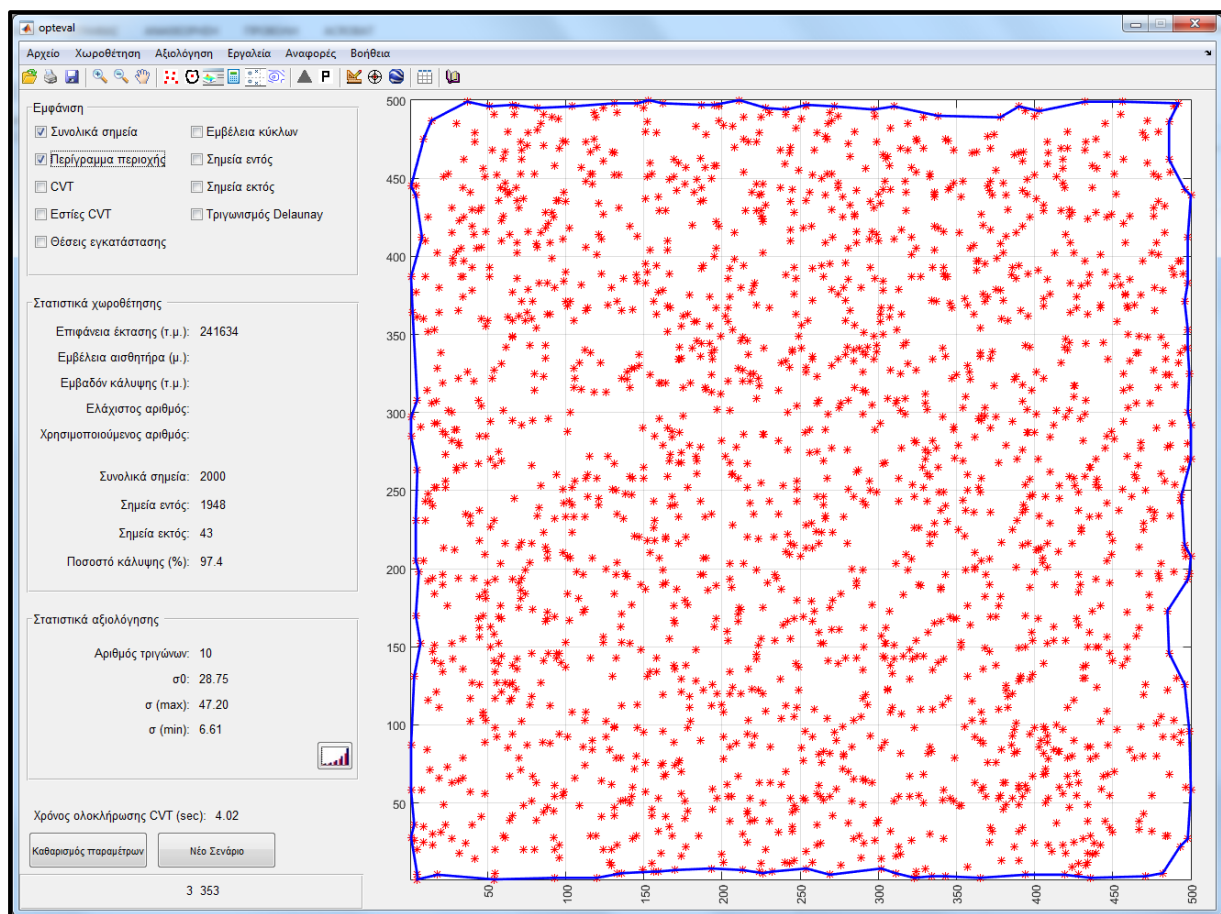
Η διαδικασία ξεκινάει με το χρήστη να επιλέγει το αρχείο συντεταγμένων των σημείων για τα οποία επιθυμεί να πραγματοποιηθεί η διαδικασία χωροθέτησης. Το αρχείο θα πρέπει να είναι ASCII (.txt) οριοθετημένο με κόμματα και να περιλαμβάνει μόνο τις συντεταγμένες των σημείων (σχήμα 4.3):



Σχήμα 4.3: Δομή αρχείου εισαγωγής

Η διαδικασία επιλογής του αρχείου γίνεται μέσα από το σχετικό παράθυρο που ανοίγει, όταν ο χρήστης πατήσει την επιλογή «Άνοιγμα αρχείου».

Στη συνέχεια με τις αντίστοιχες επιλογές εμφανίζει στο πλαίσιο γραφικών τα σημεία και το εξωτερικό περίγραμμα τους, με το οποίο υπολογίζεται και το εμβαδόν της έκτασης (σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.4: Εμφάνιση σημείων και εξωτερικού περιγράμματος

Στο σημείο αυτό ο χρήστης καλείται να εισάγει τις απαιτούμενες παραμέτρους για την κατασκευή της κεντροειδούς διαμέρισης Voronoi (CVT), στην αντίστοιχη φόρμα (σχήμα 4.5)

Εισαγωγή παραμέτρων

Εμβαδόν περιοχής (τ.μ.): 241634

Εμβέλεια αισθητήρα (μ.): 25 Κάλυψη αισθητήρα (τ.μ.): 1963.5

Αισθητήρες

Ελάχιστος αριθμός αισθητήρων: 123

Επιθυμητός αριθμός αισθητήρων 150

Αριθμός Επαναλήψεων

Αριθμός επαναλήψεων 200

Κριτήριο σύγκλισης ΔS (μ.)

OK

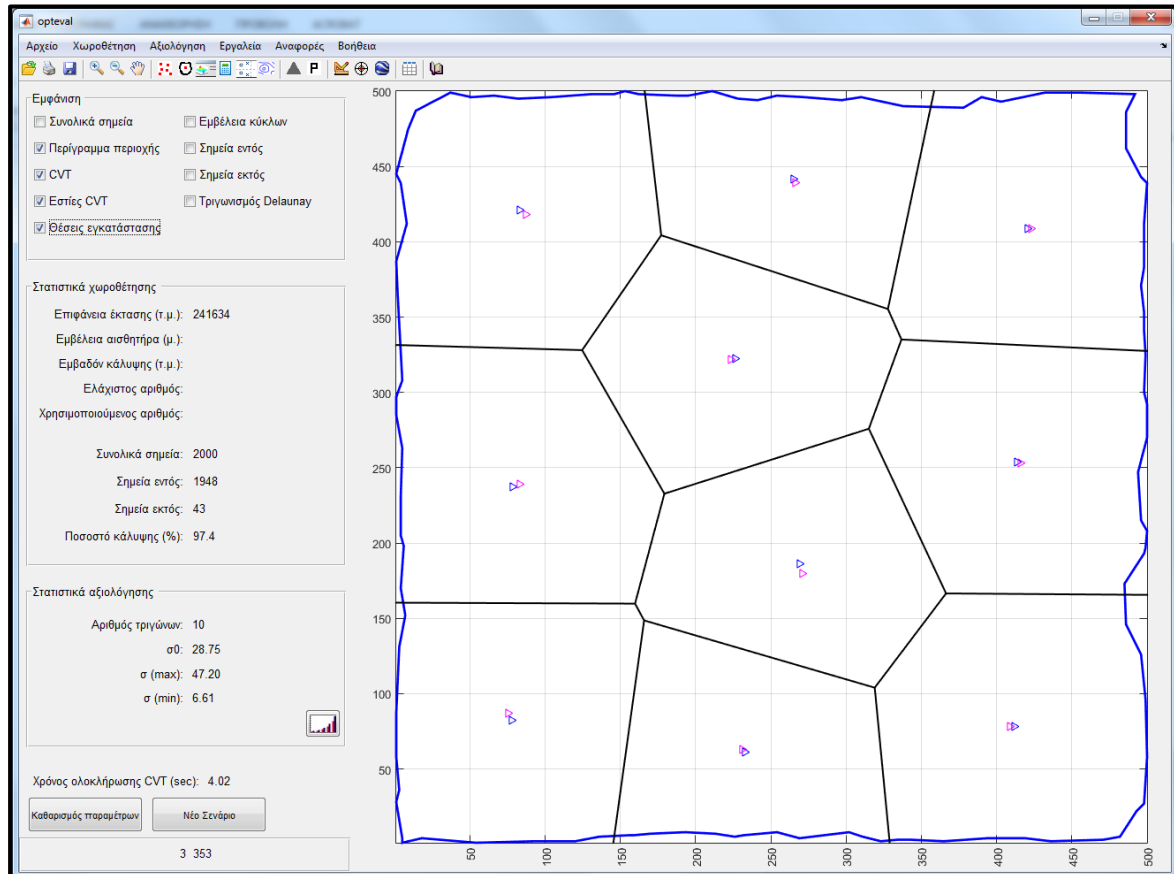
Σχήμα 4.5: Εισαγωγή παραμέτρων CVT

Αφού εισάγει την εμβέλεια του αισθητήρα, ενημερώνεται για την έκταση που καλύπτει αυτός, καθώς και για τον ελάχιστο θεωρητικό αριθμό αισθητήρων που απαιτούνται για να καλύψουν πλήρως την έκταση. Έτσι αποφασίζει για τον αριθμό αισθητήρων του σεναρίου. Τέλος επιλέγει αν το πρόγραμμα θα εκτελέσει συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων ή θα τερματισθεί με βάση το κριτήριο σύγκλισης.

Σταδιακά ενημερώνεται με στοιχεία και το πλαίσιο «Στατιστικά χωροθέτησης». Εξετάζοντας αυτά στην πορεία εκτέλεσης του προγράμματος, ο χρήστης ενημερώνεται για τα δεδομένα και τους υπολογισμούς και μπορεί να ανατροφοδοτήσει το πρόγραμμα με νέες παραμέτρους.

Επόμενο στάδιο είναι η δημιουργία των πολυγώνων CVT. Μετά την κατασκευή τους, τα πολύγωνα και οι εστίες τους, εμφανίζονται στο πλαίσιο γραφικών. Ο χρήστης μπορεί να έχει μια πρώτη οπτική εικόνα σχετικά με τη γεωμετρία και κατά πόσον τα πολύγωνα προσεγγίζουν γεωμετρία κανονικών εξαγώνων. Υπενθυμίζεται ότι η επίτευξη ιδανικής γεωμετρίας εξαρτάται από τον αριθμό των εστιών (αισθητήρων) και τον αριθμό και την κατανομή στο χώρο των υπαρχόντων σημείων.

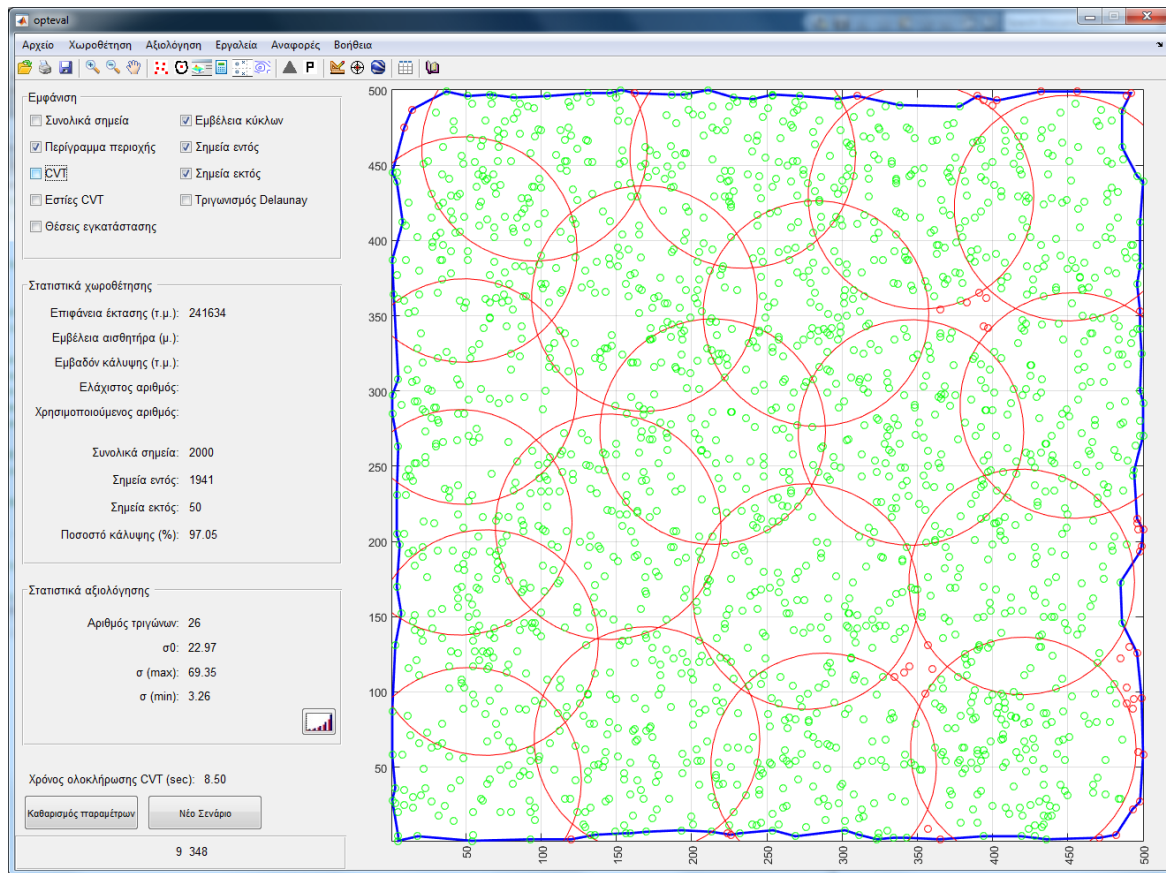
Με την αντίστοιχη επιλογή, η εστία κάθε πολυγώνου (θεωρητική θέση), μετατοπίζεται στην αμέσως πλησιέστερη υπαρκτή. Αυτές είναι και οι τελικές προτεινόμενες θέσεις εγκατάστασης. Στο σχήμα 4.6 απεικονίζονται με μπλε χρώμα οι εστίες των πολυγώνων και με μωβ χρώμα, η θέση στην οποία μετατοπίστηκε κάθε μία. Η αντίστοιχη απόσταση καταγράφεται σε αρχείο, ώστε να παρέχεται ως πληροφορία στο χρήστη.



Σχήμα 4.6: Πολύγωνα CVT, θεωρητικές και τελικές θέσεις εγκατάστασης

Τελευταία λειτουργία της διαδικασίας χωροθέτησης, είναι ο προσδιορισμός και η απεικόνιση των επιβλεπόμενων σημείων. Των σημείων, δηλαδή, που βρίσκονται στην εμβέλεια ενός τουλάχιστον αισθητήρα. Με την αντίστοιχη επιλογή ο χρήστης μπορεί να εμφανίσει στο πλαίσιο γραφικών, την εμβέλεια των αισθητήρων και τα σημεία που βρίσκονται εντός ή εκτός αυτής, κατάλληλα χρωματισμένα. Έτσι μπορεί να έχει οπτική εικόνα, σχετικά με το που δημιουργούνται προβλήματα κάλυψης, ώστε αν το επιθυμεί να παρέμβει χειροκίνητα.

Τέλος στο πλαίσιο των στατιστικών παρέχεται και η ποσοτική πληροφορία, σχετικά με το ποσοστό κάλυψης που επιτυγχάνεται με τη συγκεκριμένη γεωμετρία (σχήμα 4.7)



Σχήμα 4.7: Απεικόνιση επιβλεπόμενων και μη επιβλεπόμενων σημείων

Σε κάθε στάδιο της διαδικασίας, ο χρήστης έχει πρόσβαση στις συντεταγμένες όλων των σημείων, μέσω του πίνακα διαχείρισης συντεταγμένων, όπου καταγράφονται:

- οι συντεταγμένες και ο αριθμός των αρχικών σημείων
- οι θέσεις τοποθέτησης αισθητήρων μετά τη διαδικασία χωροθέτησης
- τα σημεία που εμπίπτουν εντός και εκτός εμβέλειας των αισθητήρων, ανάλογα με την ακτίνα που επιλέγεται κάθε φορά (σχήμα 4.8).

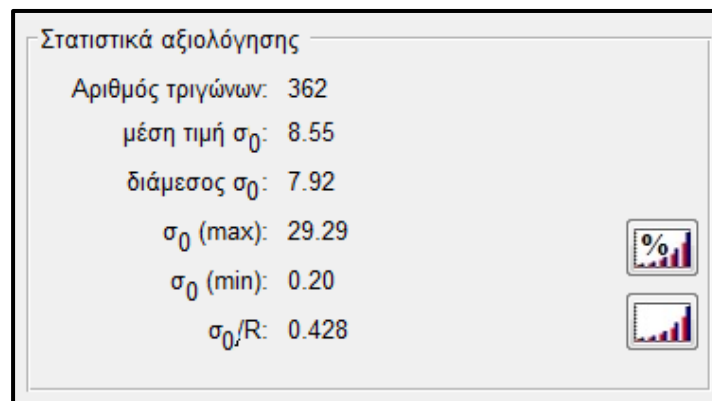
Αρχικές Συντεταγμένες			Συντεταγμένες αισθητήρων			Συντεταγμένες σημείων εντός			Συντεταγμένες σημείων εκτός		
	X	Y		X	Y		X	Y		X	Y
1	427	55	17	268	141	1	1	28	22	41	127
2	41	320	18	308	443	2	1	285	23	48	56
3	336	419	19	209	88	3	1	297	24	52	150
4	434	12	20	226	50	4	1	445	25	54	1
5	394	4	21	283	86	5	2	364	26	55	193
6	313	379	22	169	451	6	3	26	27	57	152
7	86	141	23	77	204	7	3	36	28	70	79
8	370	477	24	94	436	8	3	131	29	71	186
9	263	24	25	346	169	9	4	205	30	74	184
10	261	23	26	170	241	10	4	231	31	77	113
11	406	99	27	110	315	11	4	377	32	78	118
12	390	32	28	73	48	12	4	445	33	90	112
13	348	291	29	152	486	13	5	20	34	93	458
14	255	359	30	408	89	14	5	263	35	101	288
15	485	122	31	336	229	15	5	308	36	112	74
16	354	244	32	465	306	16	5	361	37	127	272
17	48	185	33	219	377	17	6	198	38	146	113
18	299	414	34	439	270	18	7	152	39	156	243
19	31	64	35	109	332	19	7	291	40	169	167
20	91	489	36	94	143	20	8	58	41	170	165
21	343	336	37	52	227	21	8	412	42	173	342
22	183	148	38	136	153	22	9	25	43	183	148
23	242	166	39	144	328	23	9	35	44	186	90
24	15	194	40	205	268	24	9	205	45	188	207
25	362	201	41	482	378	25	9	360	46	190	207
26	259	468	42	368	182	26	10	231	47	193	8
27	225	11	43	100	155	27	10	243	48	197	302

Σχήμα 4.8: Πίνακας διαχείρισης συντεταγμένων

4.3.2 Διαδικασία αξιολόγησης δικτύου

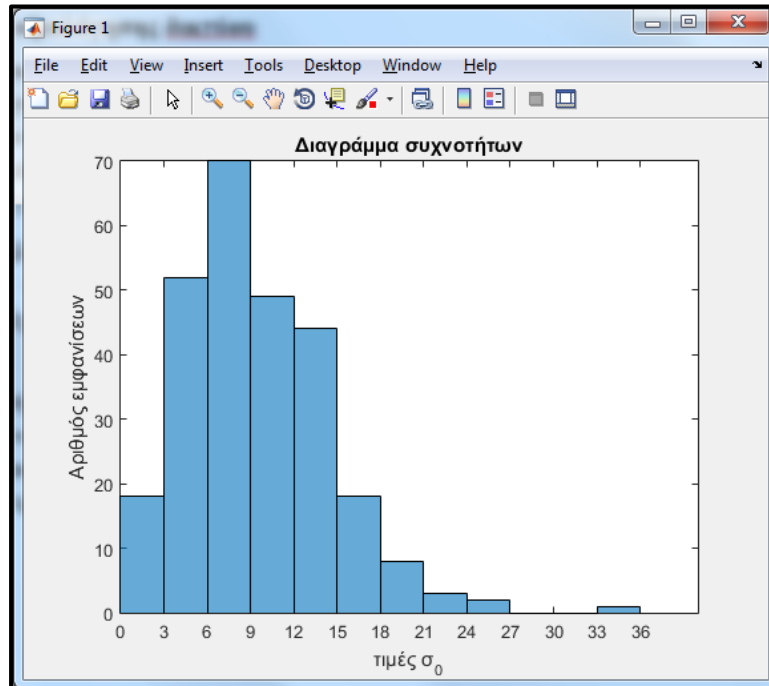
Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας χωροθέτησης, ακολουθεί η διαδικασία αξιολόγησης της λύσης. Το πρόγραμμα εκτελεί τον τριγωνισμό Delaunay και εμφανίζει τα τρίγωνα που δημιουργούνται από τις τελικές θέσεις χωροθέτησης. Αυτά είναι που συγκρίνονται με την ιδανική γεωμετρία που σχηματίζει ένα πλέγμα ισοπλευρών τριγώνων.

Αρχικά η σχεδιάσή τους δίνει μια οπτική εικόνα του πόσο καλά προσεγγίζουν τον τριγωνικό κάναβο. Επιπλέον, το πλαίσιο «Στατιστικά αξιολόγησης» παρέχει στο χρήστη πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα της λύσης (σχήμα 4.9).



Σχήμα 4.9: Πλαίσιο στατιστικών αξιολόγησης

Επιπλέον ο χρήστης μπορεί να εμφανίσει το αντίστοιχο ιστόγραμμα συχνοτήτων και σχετικών συχνοτήτων, ώστε να έχει εικόνα της κατανομής των τυπικών αποκλίσεων των τριγώνων (σχήμα 4.10). Προφανώς όταν αυτές συγκεντρώνονται σε μικρές τιμές, όλο και περισσότερα τρίγωνα έχουν πλευρές που πλησιάζουν τα ισόπλευρα τρίγωνα, άρα και η γεωμετρία που δημιουργείται προσομοιάζει καλύτερα την ιδανική.



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα συχνοτήτων τυπικών αποκλίσεων

4.4 Προσομοίωση αλγορίθμου χωροθέτησης και αξιολόγησης

Προκειμένου να εξετασθεί η λειτουργία και η αποδοτικότητα του αλγορίθμου χωροθέτησης και αξιολόγησης, δημιουργούνται διαφορετικά σενάρια και πραγματοποιούνται δοκιμές με διαφορετικές παραμέτρους.

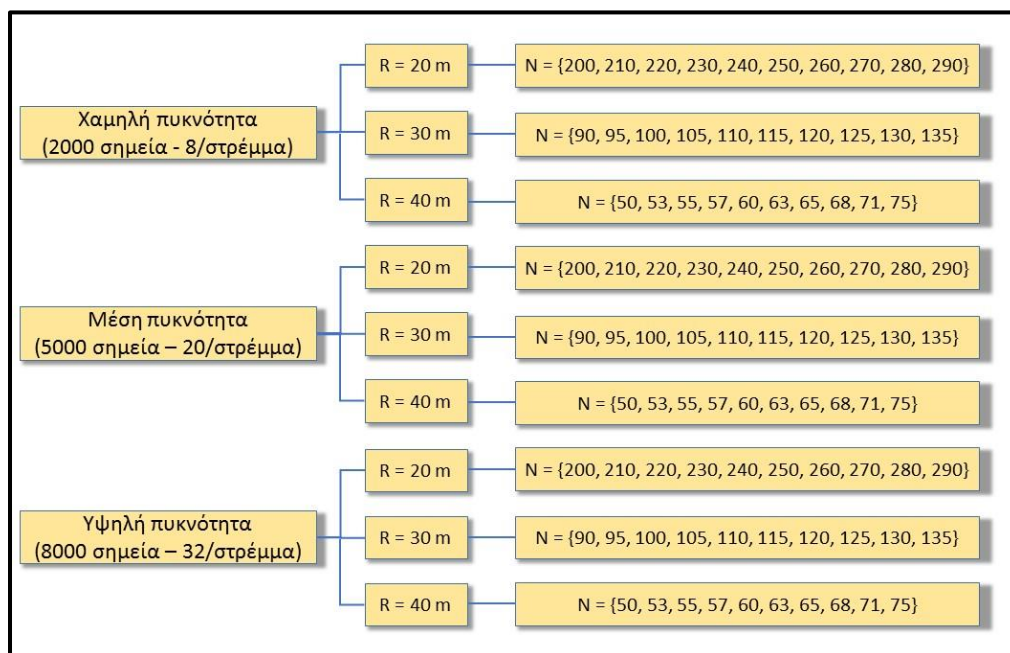
Τα δεδομένα με τα οποία γίνονται οι δοκιμές είναι τυχαία σημεία, εντός συγκεκριμένου εύρους κανάβου. Στην πραγματικότητα, σε ένα αληθινό σενάριο χωροθέτησης, τα σημεία προέρχονται από μετρήσεις, αλλά σε κάθε περίπτωση σπάνια ακολουθούν κάποιο συγκεκριμένο μοτίβο. Έτσι η παραδοχή των σεναρίων, μπορεί να ανταποκρίνεται σε οποιοδήποτε πραγματικό σενάριο.

Παρακάτω παρουσιάζονται τρία από τα σενάρια και αφορούν σε μια περιοχή επίβλεψης 500m x 500m. Εξετάζονται 3 διαφορετικές πυκνότητες σημείων: χαμηλή, μέση και υψηλή. Για κάθε μία περίπτωση χρησιμοποιούνται 3 διαφορετικής εμβέλειας αισθητήρες (20m, 30m και 40m). Τέλος για κάθε μία από τις διαφορετικές περιπτώσεις, εξετάζεται η κάλυψη της περιοχής και η γεωμετρική αξιολόγηση του δικτύου, για διαφορετικό αριθμό αισθητήρων (10

διαφορετικές περιπτώσεις), ξεκινώντας από τον ελάχιστο απαιτούμενο αριθμό και αυξάνοντας σταδιακά τον αριθμό τους, μέχρι περίπου 50% περισσότερους αισθητήρες από τον ελάχιστο αριθμό. Οι 90 διαφορετικές περιπτώσεις παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1 και για εποπτικούς λόγους με μορφή δενδρογράμματος στο σχήμα 4.11.

Βασικό Σενάριο	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3
Εύρος περιοχής μελέτης (m)	500 x 500		
Έκταση (στρέμματα)	250		
Πυκνότητα	Χαμηλή	Μεσαία	Υψηλή
Αριθμός σημείων παρατήρησης	2000	5000	8000
Πυκνότητα σημείων (σημεία ανά στρέμμα)	8	20	32
Εξεταζόμενες εμβέλειες	20m, 30m, 40m		
Αριθμός χρησιμοποιούμενων αισθητήρων ανάλογα με την εξεταζόμενη εμβέλεια	Για R = 20: 200, 210, 220, 230, 240, 250, 260, 270, 280, 290 Για R = 30: 90, 95, 100, 105, 110, 115, 120, 125, 130, 135 Για R = 40: 50, 53, 55, 57, 60, 63, 65, 68, 71, 75		

Πίνακας 4.1: Παράμετροι των σεναρίων μελέτης



Σχήμα 4.11: Παράμετροι των σεναρίων μελέτης

Για κάθε περίπτωση καταγράφονται ο αριθμός των σημείων που δεν επιβλέπονται από κανένα αισθητήρα και το ποσοστό κάλυψης του δικτύου, ο αριθμός των τριγώνων κατά τον τριγωνισμό Delaunay κατά τη διαδικασία αξιολόγησης του δικτύου, η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης των πλευρών του τριγώνου $\bar{\sigma}_0$ και ο δείκτης g . Ενδεικτικά, καταγράφεται και ο χρόνος που απαιτείται για την προσομοίωση κάθε σεναρίου.

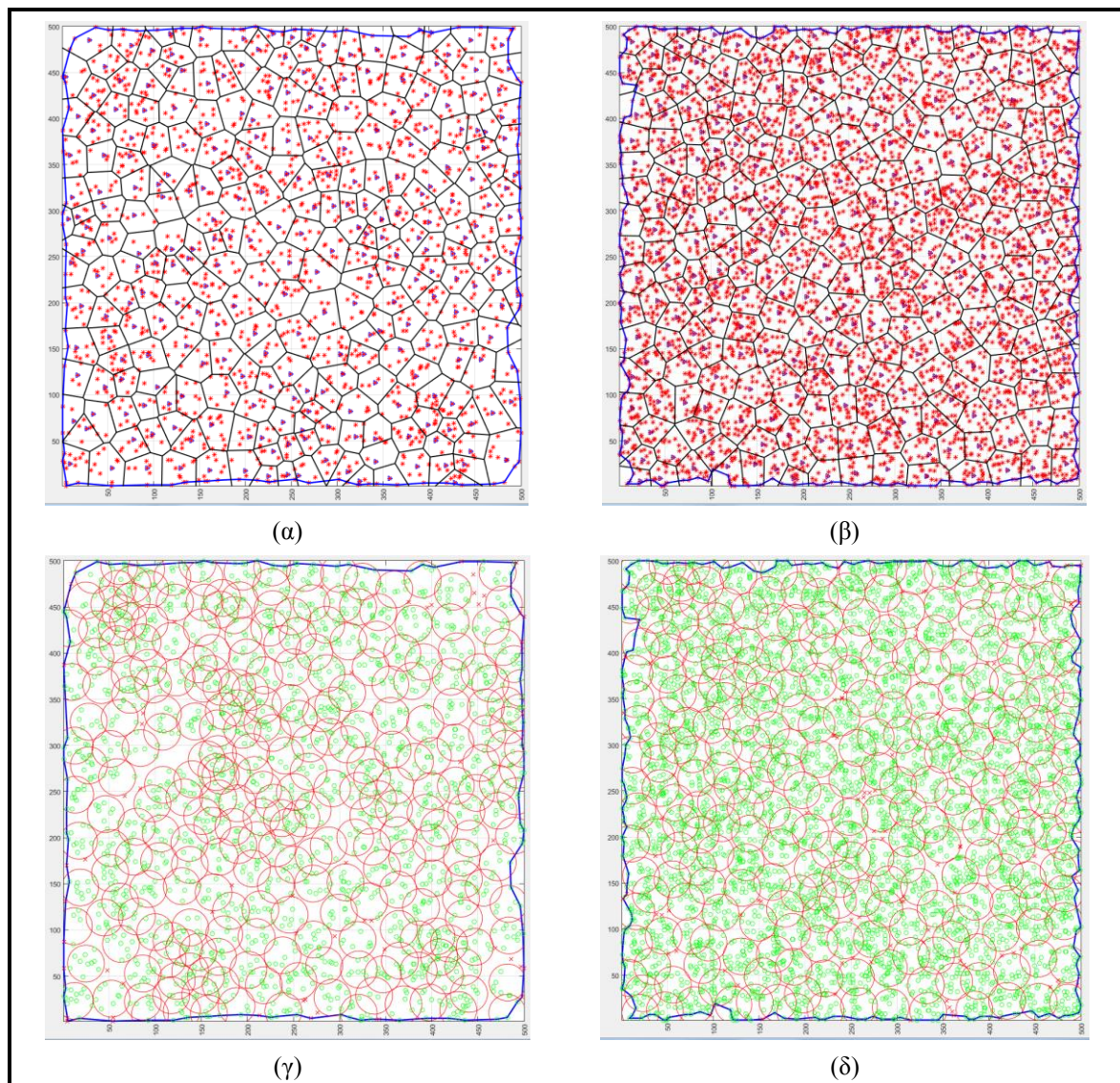
Τα αποτελέσματα των 90 περιπτώσεων παρατίθενται αναλυτικά στο Παράρτημα Α.

Στο σχήμα 4.12, παρατίθενται δύο από τα σενάρια χωροθέτησης:

- $n = 2000$ σημεία, $R = 20m$ και $N = 270$ αισθητήρες (σχ. 4.12.α)
- $n = 5000$ σημεία, $R = 20m$ και $N = 270$ αισθητήρες (σχ. 4.12.β)

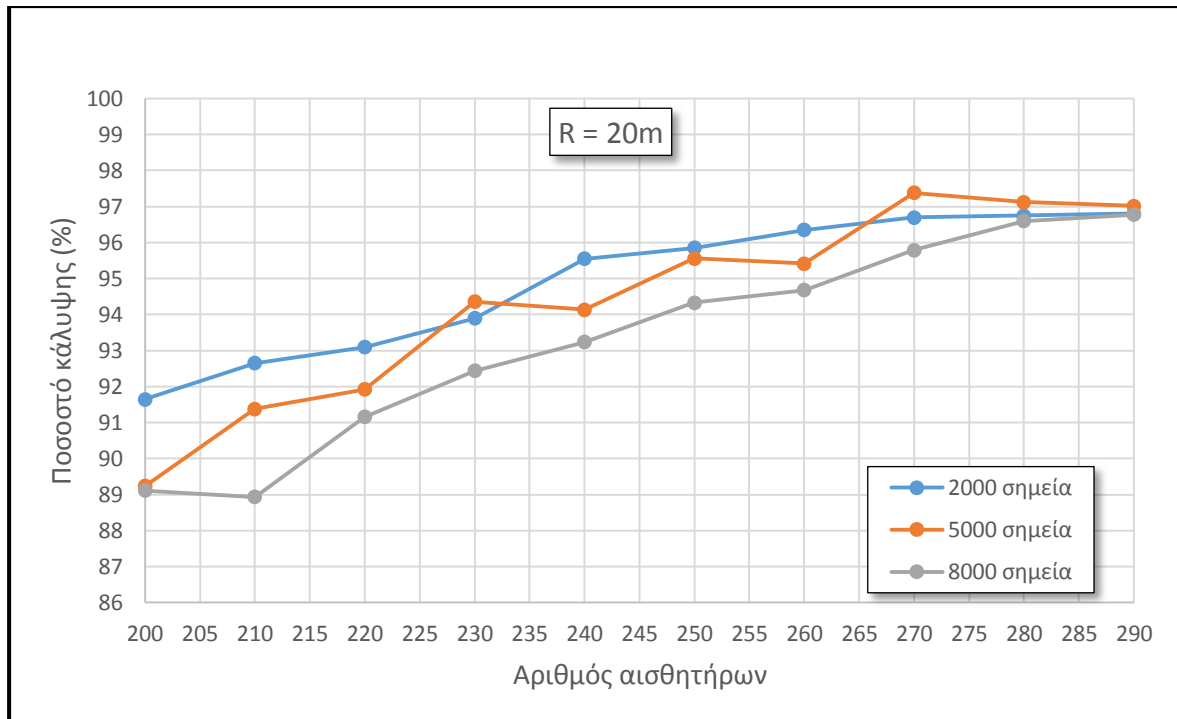
Τα ποσοστά κάλυψης για τις δύο περιπτώσεις είναι 96.7% (57 μη επιβλεπόμενα σημεία) και 97.4% (94 μη επιβλεπόμενα σημεία) αντίστοιχα.

Στα σχ. 4.12.γ και 4.12.δ παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα χωροθέτησης. Τα μη επιβλεπόμενα σημεία, απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα και συγκεντρώνονται κυρίως κοντά ή πάνω στο εξωτερικό όριο της περιοχής μελέτης (μπλε περίγραμμα), ενώ ελάχιστα βρίσκονται εντός της περιοχής.

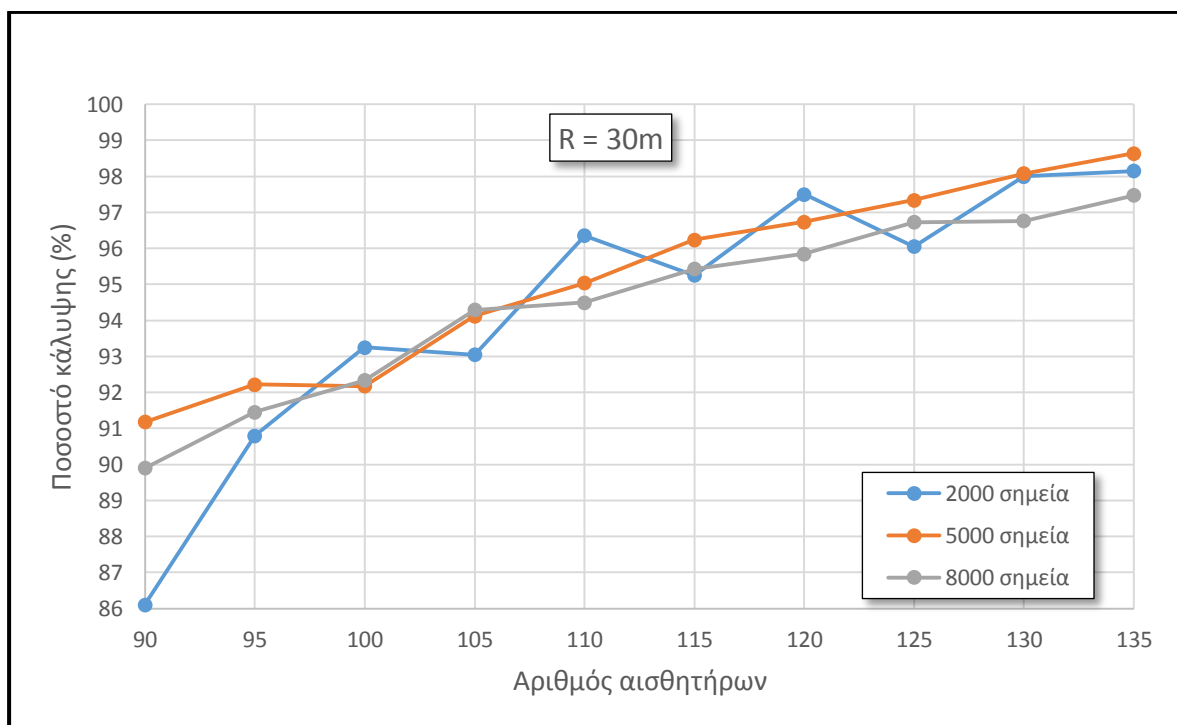


Σχήμα 4.12: Χωροθέτηση για 2000 (α, γ) & 5000 (β, δ) σημεία, με $R=20m$ και $N=270$

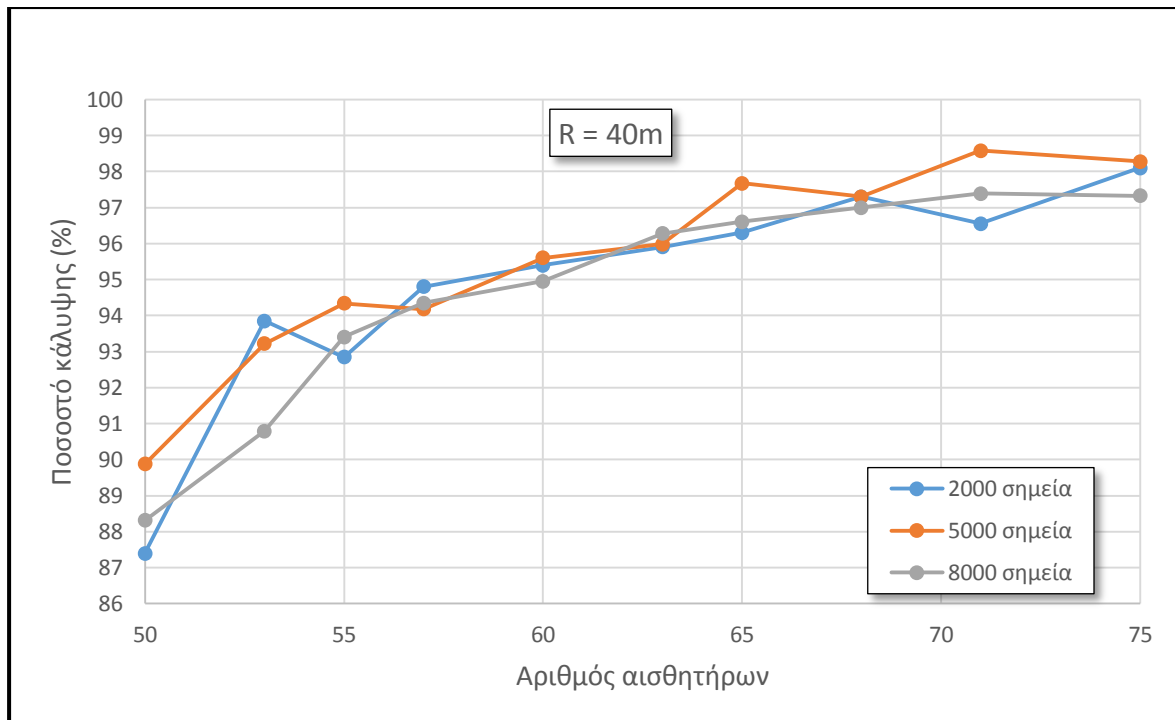
Στα σχήματα 4.13 – 4.15 απεικονίζεται η κάλυψη που επιτυγχάνεται σε συνάρτηση με τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων αισθητήρων.



Σχήμα 4.13: Ποσοστιαία κάλυψη περιοχής μελέτης για $R = 20m$



Σχήμα 4.14: Ποσοστιαία κάλυψη περιοχής μελέτης για $R = 30m$



Σχήμα 4.15: Ποσοστιαία κάλυψη περιοχής μελέτης για $R = 40m$

Η αύξηση των αισθητήρων πάνω από έναν αριθμό δεν οδηγεί σε σημαντική αύξηση του ποσοστού κάλυψης. Έτσι το κόστος του δικτύου αυξάνεται χωρίς να βελτιώνεται σημαντικά η επιθυμητή λύση.

Η απόφαση που πρέπει να ληφθεί λοιπόν, είναι κατά πόσον η αύξηση του αριθμού των αισθητήρων προκαλεί την επιθυμητή αύξηση και στην κάλυψη του δικτύου. Αυτή εξαρτάται κυρίως από τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής και το κόστος που δημιουργεί ο επιπλέον αριθμός αισθητήρων στο συνολικό κόστος του δικτύου.

Στην περίπτωση που κάποια περιοχή παραμένει χωρίς επίβλεψη, λόγω της γεωμετρίας που παρουσιάζει και κρίνεται σημαντική για τις ανάγκες της εφαρμογής, ο χρήστης μπορεί να επέμβει και να τοποθετηθούν επιπλέον αισθητήρες, ειδικά στην περιοχή αυτή.

Συγκεκριμένα, σε όλες τις περιπτώσεις ακόμα και αν χρησιμοποιηθεί ο ελάχιστος αριθμός αισθητήρων επιτυγχάνεται κάλυψη της τάξης του 85% - 90%. Αντίστοιχα σε καμία περίπτωση δεν επιτυγχάνεται πλήρης κάλυψη ακόμα και αν χρησιμοποιηθούν 50% περισσότεροι αισθητήρες. Η μέγιστη κάλυψη που επιτυγχάνεται είναι της τάξης του 97%. Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω τα περισσότερα μη επιβλεπόμενα σημεία συγκεντρώνονται στο εξωτερικό όριο της περιοχής μελέτης.

Οι καμπύλες που απεικονίζουν το ποσοστό κάλυψης στην περιοχή χαμηλής πυκνότητας παρουσιάζουν εξάρσεις και λιγότερο ομαλή μορφή καμπύλης.

Λιγότερες εξάρσεις παρουσιάζει η κάλυψη στην περιοχή μέση πυκνότητας, ενώ η καμπύλη της κάλυψης στην περιοχή υψηλής πυκνότητας παρουσιάζει ομαλή μορφή. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο καθώς περιοχή με χαμηλότερη πυκνότητα υποψήφιων θέσεων εγκατάστασης, συνεπάγεται και μεγαλύτερες μετατοπίσεις στις τελικές θέσεις εγκατάστασης των αισθητήρων, άρα και πολύγωνα που σχηματικά θα απέχουν περισσότερο από τα ιδανικά εξάγωνα.

Η εμβέλεια ανίχνευσης του αισθητήρα δε φαίνεται να επηρεάζει το ποσοστό κάλυψης που επιτυγχάνεται. Η ίδια ποσοστιαία αύξηση στον αριθμό των αισθητήρων, οδηγεί σε παρόμοια αύξηση στο ποσοστό κάλυψης. Έτσι ναι μεν, η ίδια έκταση καλύπτεται με λιγότερο αριθμό αισθητήρων, όμως αισθητήρες μεγαλύτερης εμβέλειας πιθανόν να συνεπάγονται και μεγαλύτερο κόστος αγοράς. Έτσι, σε κάθε περίπτωση η τελική επιλογή θα πρέπει να είναι και συνάρτηση οικονομικών παραγόντων.

Παρόλ' αυτά την καλύτερη συμπεριφορά σε ότι αφορά στο ποσοστό κάλυψης στις τρεις περιοχές μελέτης συνολικά, παρουσιάζει ο αισθητήρας με τη μεγαλύτερη ακτίνα. Για τον ίδιο αριθμό αισθητήρων, το ποσοστό κάλυψης στις περιοχές μελέτης (χαμηλής, μέσης και υψηλής πυκνότητας) παρουσιάζει μικρότερες διακυμάνσεις, σε σχέση με τους άλλους δύο τύπους αισθητήρων. Συνεπώς θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές με ανομοιόμορφη πυκνότητα σημείων, χωρίς να χρειαστεί αυτή να χωρισθεί σε επιμέρους τμήματα, για να οποία θα έπρεπε να γίνει ξεχωριστή μελέτη.

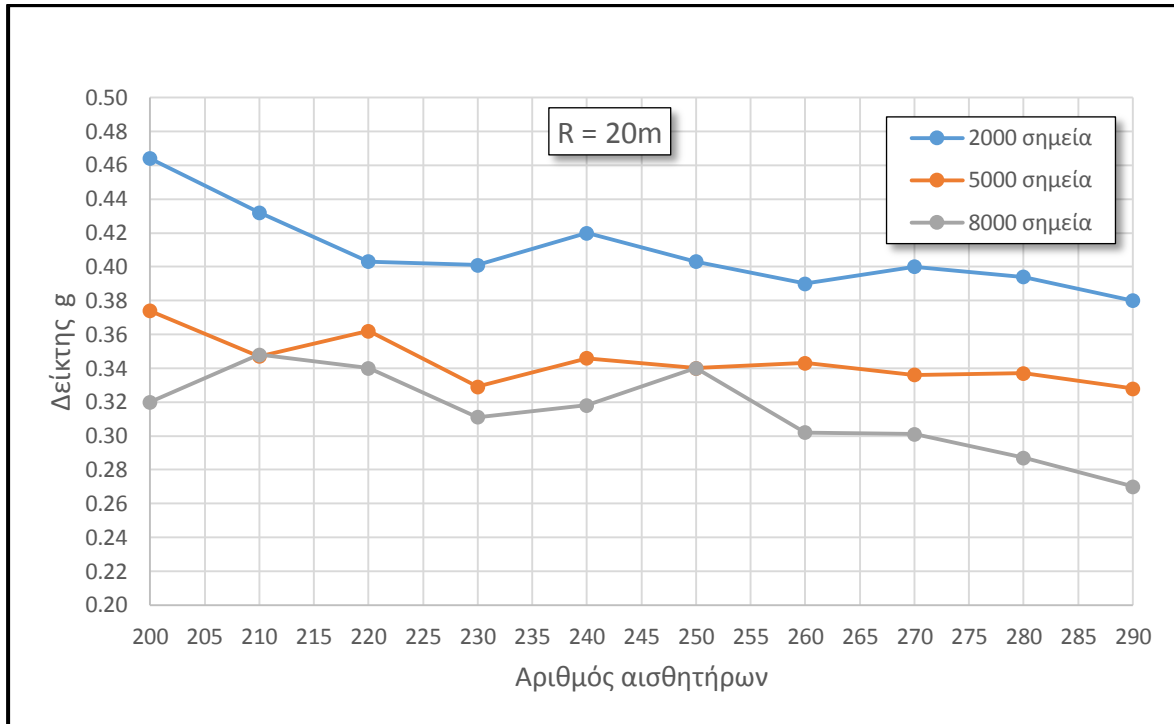
Στα σχήματα 4.16 – 4.18 απεικονίζεται η μεταβολή του δείκτη g του δικτύου. Υπενθυμίζεται ότι η μετρική αναφέρεται στο κατά πόσον το ακανόνιστο πλέγμα τριγώνων (TIN) που δημιουργείται, προσεγγίζει τον ιδανικό κάναβο ισοπλεύρων τριγώνων, αναλογικά με την εμβέλεια ανίχνευσης του αισθητήρα. Όσο μικρότερες τιμές λαμβάνει ο δείκτης, τόσο περισσότερο ο τυχαίος κάναβος προσεγγίζει τον κανονικό.

Παρατηρώντας τα τρία σχήματα εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

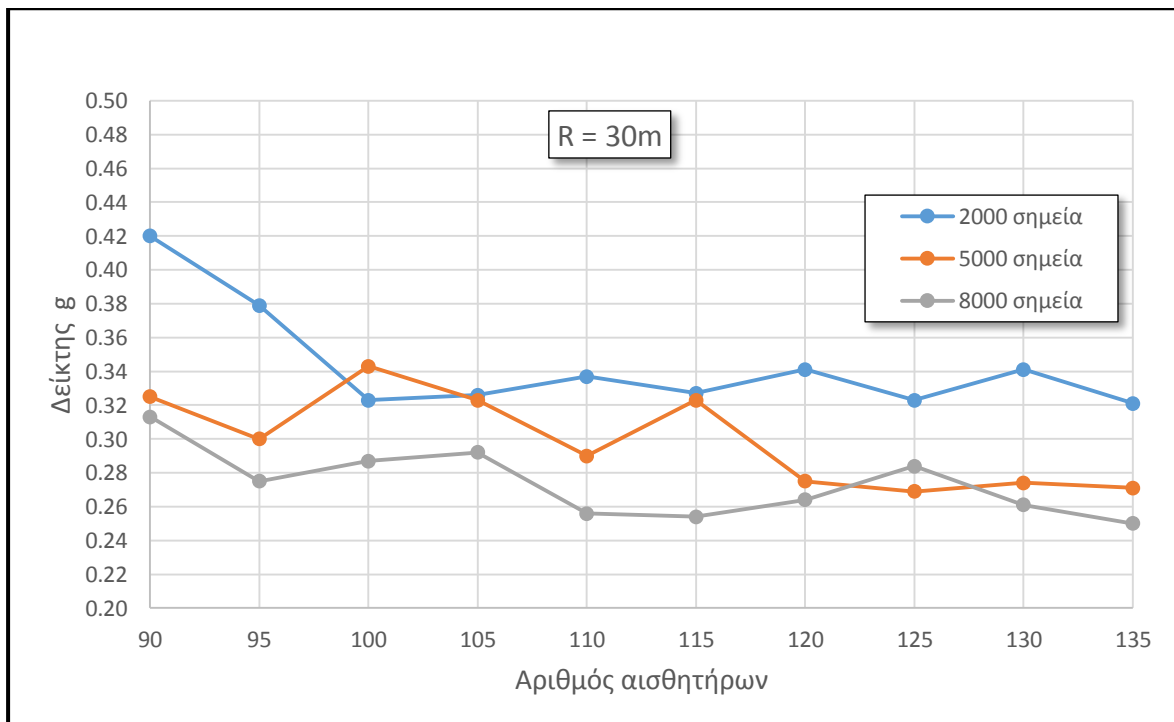
- καθώς αυξάνεται ο αριθμός των αισθητήρων, μειώνεται ο δείκτης g και συνεπώς τόσο καλύτερη προσαρμογή επιτυγχάνεται.
- όσο αυξάνεται η πυκνότητα των σημείων στην περιοχή μελέτης, τόσο μειώνεται ο δείκτης g .

Και τα δύο συμπεράσματα είναι αναμενόμενα καθώς, αφενός μεγαλύτερος αριθμός αισθητήρων συνεπάγεται και περισσότερο ομοιόμορφη κατανομή αυτών στο χώρο, αφετέρου μεγαλύτερη πυκνότητα σημείων παρατήρησης, συνεπάγεται εξ' ορισμού ότι κατά την κατασκευή της κεντροειδούς διαμέρισης Voronoi, θα προκύψουν πολύγωνα που θα μοιάζουν περισσότερο με κανονικά

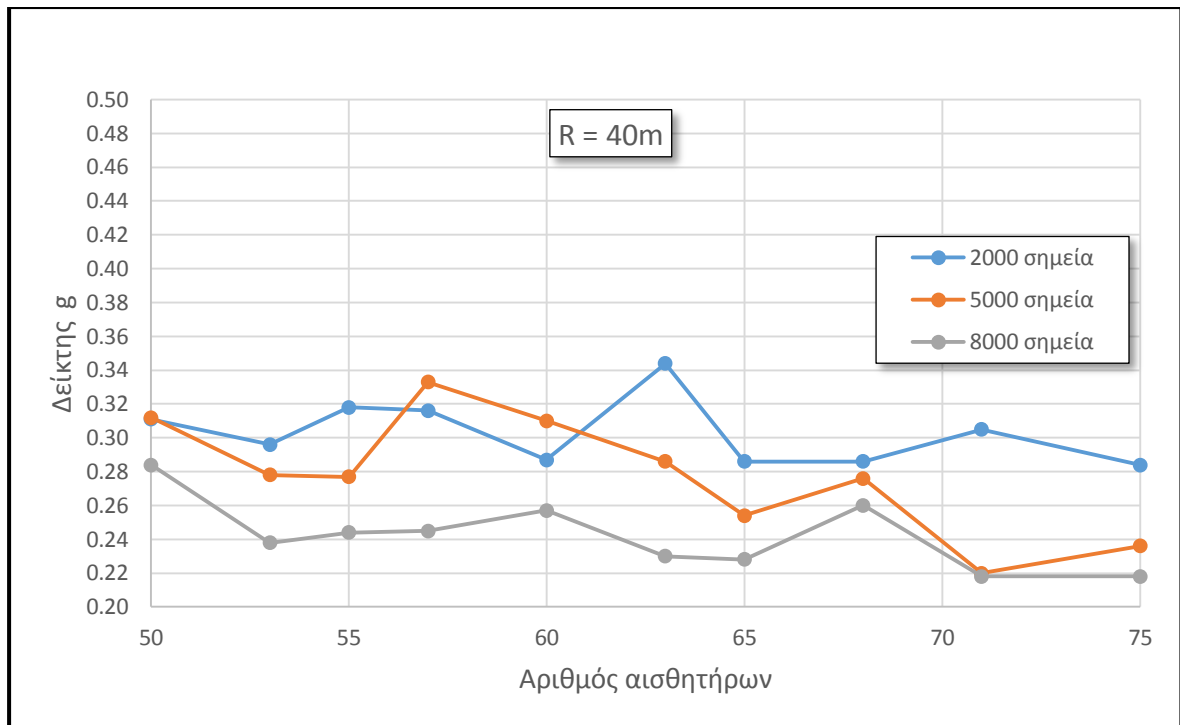
εξάγωνα. Επιπλέον κατά τη μετατόπιση της θεωρητικής θέσης στην εγγύτερη πραγματική, η μετατόπιση θα είναι μικρότερη σε περιοχές με μεγαλύτερη πυκνότητα σημείων. Έτσι το τελικό πλέγμα τριγώνων στις πραγματικές θέσεις, θα διαφέρει ελάχιστα από το ιδανικό πλέγμα που θα δημιουργούσαν τα κέντρα των CVT.



Σχήμα 4.16: Γεωμετρική αξιολόγηση του δικτύου για $R = 20m$



Σχήμα 4.17: Γεωμετρική αξιολόγηση του δικτύου για $R = 30m$



Σχήμα 4.18: Γεωμετρική αξιολόγηση του δικτύου για $R = 40m$

4.4.1 Προσομοίωση αλγορίθμου χωροθέτησης σε ειδικές περιπτώσεις

Υπάρχουν περιπτώσεις ή εφαρμογές όπου η περιοχή μελέτης παρουσιάζει ιδιαιτερότητες και συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

Για παράδειγμα είναι πιθανό να μην ενδιαφέρει η κάλυψη ολόκληρης της περιοχής, αλλά μία ζώνη επιρροής (buffer zone) περιμετρικά αυτής. Σε μια εφαρμογή ανίχνευσης πυρκαγιάς σε δάσος, είναι πιθανό η εστία εκκίνησης να προέρχεται από τον περιμετρικό δρόμο του δάσους και όχι από κάποια πηγή εντός αυτού. Έτσι η φύλαξη και τα μέτρα πρόληψης να πρέπει να περιοριστούν μόνο σε κάποιο εύρος εντός του περιμετρικού δρόμου.

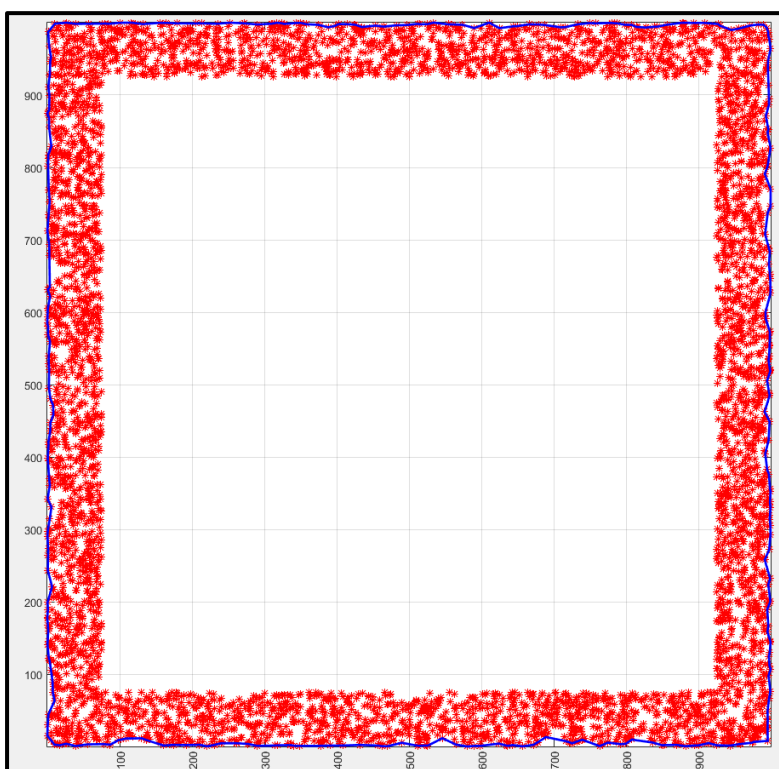
Μία ακόμα ειδική περίπτωση μελέτης είναι η ύπαρξη μεγάλων κενών (holes) εντός της περιοχής μελέτης. Έτσι σε μεγάλα τμήματα της περιοχής, είναι αδύνατη η τοποθέτηση αισθητήρων.

Προκειμένου να εξετασθεί η αποδοτικότητα του αλγορίθμου σε αυτές τις ειδικές περιπτώσεις, δημιουργήθηκαν σενάρια τα οποία λαμβάνουν υπόψη τους περιορισμούς και τις απαιτήσεις τοποθέτησης.

4.4.1.1 Ζώνη επιρροής (buffer zone) γύρω από την περιοχή μελέτης

Λαμβάνεται ως περιοχή μελέτης, έκταση διαστάσεων 1000m x 1000m, μέσης χωρικής πυκνότητας. Ως περιοχή μέσης χωρικής πυκνότητας, νοείται περιοχή με μέση πυκνότητα $\rho = 20$ σημεία/στρέμμα, η οποία χρησιμοποιήθηκε και για τις προσομοιώσεις της προηγούμενης παραγράφου (σχήμα 4.19)

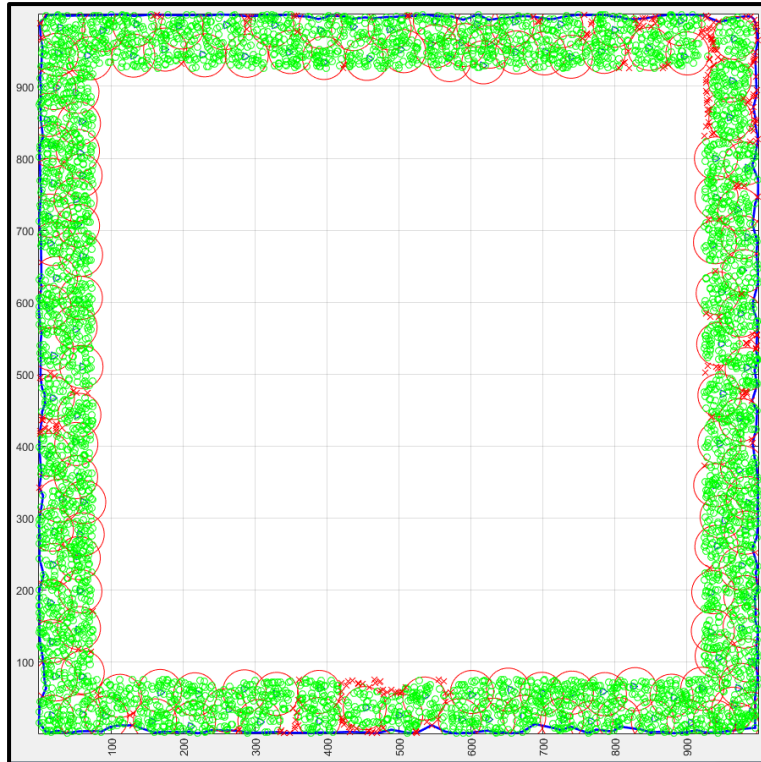
Ζητούμενο είναι η χωροθέτηση αισθητήρων σε μία ζώνη εύρους 75m, γύρω από το περιμετρικό όριο της περιοχής. Χρησιμοποιούνται αισθητήρες βεληνεκούς $R = 30m$.



Σχήμα 4.19: Περίπτωση μελέτης με ζώνη επιρροής 75m

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.20 ο αλγόριθμος παρέχει λύση και στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί σε περιοχή με ζώνη επιρροής. Στη συγκεκριμένη χωροθέτηση χρησιμοποιήθηκαν 140 αισθητήρες, ενώ ο ελάχιστος αριθμός σύμφωνα με τη σχέση 2.13 είναι 98 (περίπου 40% περισσότεροι).

Η κάλυψη που επιτυγχάνεται είναι 95.28% αφήνοντας χωρίς επίβλεψη 262 από τα 5550 σημεία. Όπως φαίνεται τα μη επιβλεπόμενα σημεία είναι κυρίως στο περίγραμμα της ζώνης επιρροής και όχι στο εσωτερικό της.



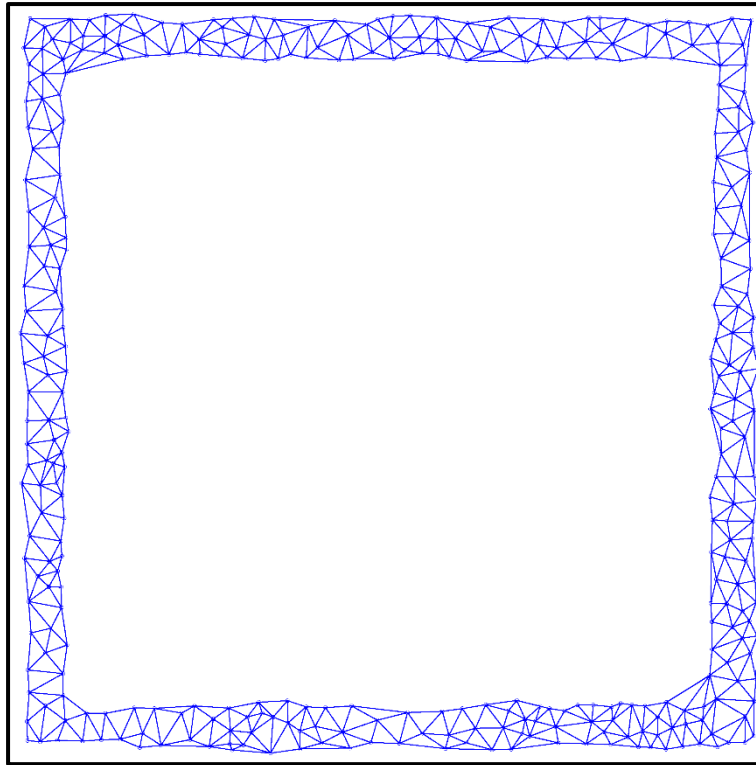
Σχήμα 4.20: Χωροθέτηση σε ζώνη 75m, με $R=30m$, $N=140$ και $\rho=20$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για να αποφευχθεί η αύξηση του συνολικού αριθμού αισθητήρων χωρίς ουσιαστικά να βελτιώνεται το ποσοστό κάλυψης, το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να λυθεί με χειροκίνητη επιλογή των θέσεων τοποθέτησης, στις περιοχές που παρουσιάζουν μεγάλη συγκέντρωση μη επιβλεπόμενων σημείων.

Υπενθυμίζεται ότι ο υπολογισμός του εμβαδού γίνεται χρησιμοποιώντας το μη κυρτό περίβλημα των εξωτερικών σημείων της περιοχής μελέτης. Συνεπώς το πραγματικό ωφέλιμο εμβαδόν της έκτασης (αυτό επί του οποίου ζητείται να γίνει η χωροθέτηση), δεν υπολογίζεται αυτοματοποιημένα, αλλά πρέπει να γίνει με διαφορετική μέθοδο, π.χ. χωρίζοντας την περιοχή σε μικρότερα τμήματα.

Κατά τη δημιουργία των τριγώνων Delaunay, δημιουργούνται και τρίγωνα με μη επιθυμητές ακμές. Αυτές είναι οι ακμές εντός του εσωτερικού της περιοχής μελέτης. Στην ιδανική περίπτωση τα τρίγωνα πρέπει να σταματούν σε κάποιο εσωτερικό όριο της ζώνης επιρροής.

Η διαδικασία αξιολόγησης έγινε με εξωτερική διαδικασία όπου ορίστηκαν οι γραμμές ασυνέχειας (breaklines) και τα εσωτερικά όρια (σχήμα 4.21). Στη συνέχεια υπολογίστηκαν τα στατιστικά μεγέθη και οι δείκτες μόνο για την περιοχή μελέτης.



Σχήμα 4.21: Τριγωνισμός Delaunay σε περιοχή με ζώνη επιρροής

Η χρήση γραμμών ασυνέχειας και εσωτερικών ορίων βελτιώνει σημαντικά τους στατιστικούς δείκτες της γεωμετρικής αξιολόγησης του δικτύου, καθώς σε διαφορετική περίπτωση οι τιμές τους επηρεάζονται από τα μη επιθυμητά μεγάλα και ακανόνιστα τρίγωνα. Οι στατιστικοί δείκτες που προέκυψαν από τη διαδικασία αξιολόγησης της χωροθέτησης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

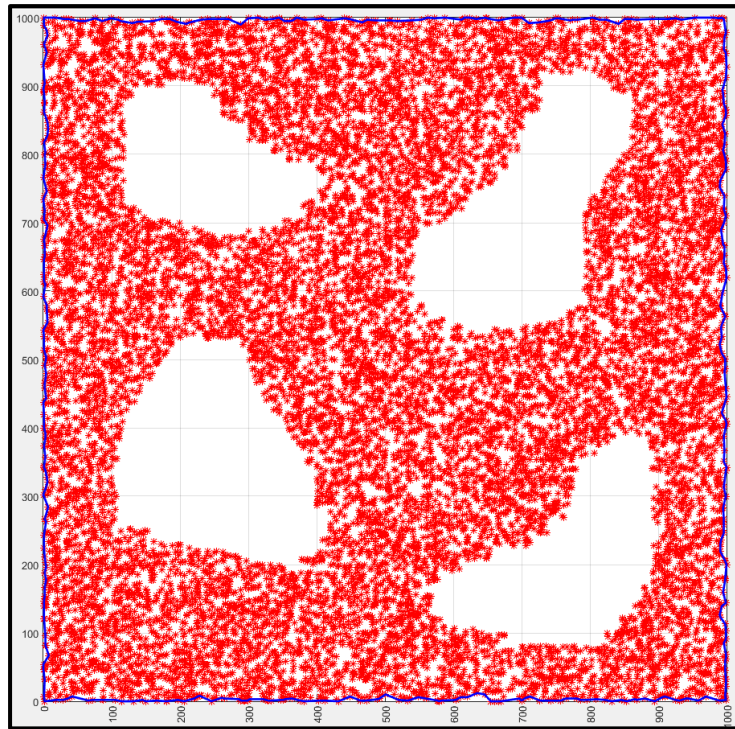
μέση τιμή $\bar{\sigma}_0$	7.17m
Διάμεσος $\bar{\sigma}_0$	6.38m
$\bar{\sigma}_0$ (max)	26.47m
$\bar{\sigma}_0$ (min)	0.49m
g	0.239

Πίνακας 4.2: Δείκτες αξιολόγησης δικτύου σε περιοχή με ζώνη επιρροής

4.4.1.2 Ύπαρξη κενών περιοχών εντός της περιοχής μελέτης.

Λαμβάνεται ως περιοχή μελέτης, έκταση διαστάσεων 1000m x 1000m, μέσης χωρικής πυκνότητας. ($\rho = 20$ σημεία/στρέμμα), η οποία χρησιμοποιήθηκε και για τις προσομοιώσεις της προηγούμενης παραγράφου. Στην περιοχή αυτή θεωρείται ότι υπάρχουν 4 μεγάλες κενές περιοχές,

ακανόνιστου σχήματος και διαφορετικού εμβαδού η κάθε μία (σχήμα 4.22). Χρησιμοποιούνται αισθητήρες βεληνεκούς $R = 30m$.

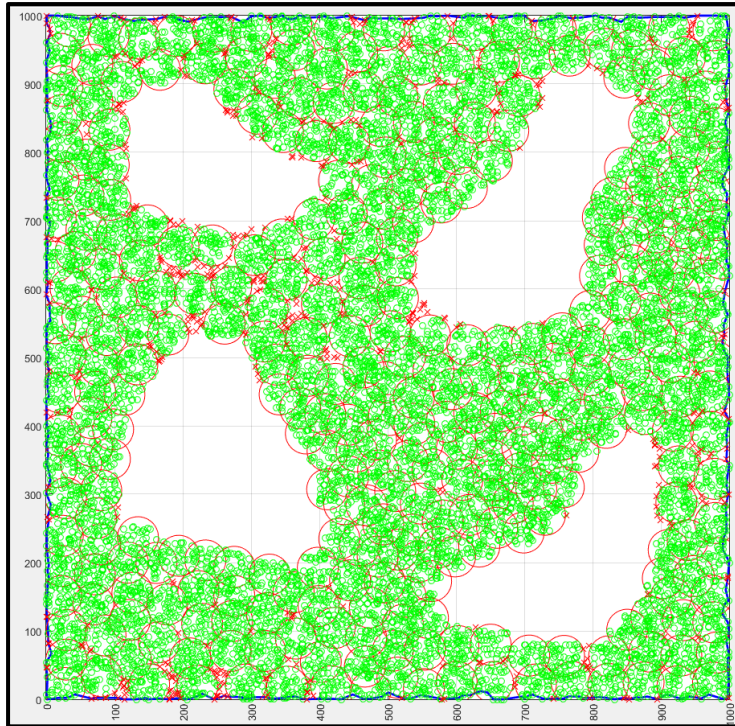


Σχήμα 4.22: Περίπτωση μελέτης με κενά εντός της περιοχής

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.23 ο αλγόριθμος παρέχει λύση και στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί σε περιοχή με μεγάλα κενά εντός αυτής. Στη συγκεκριμένη χωροθέτηση χρησιμοποιήθηκαν 350 αισθητήρες, ενώ ο ελάχιστος αριθμός σύμφωνα με τη σχέση 2.13 είναι 265 (περίπου 35% περισσότεροι).

Η κάλυψη που επιτυγχάνεται είναι 95.60% αφήνοντας χωρίς επίβλεψη 523 από τα 15088 σημεία. Όπως φαίνεται τα μη επιβλεπόμενα σημεία είναι κυρίως στο εξωτερικό και στο εσωτερικό περίγραμμα (εν επαφή με τις κενές ζώνες) της περιοχής μελέτης. Και σε αυτή την περίπτωση το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με χειροκίνητη επιλογή των θέσεων τοποθέτησης, στις περιοχές που παρουσιάζουν έντονο πρόβλημα.

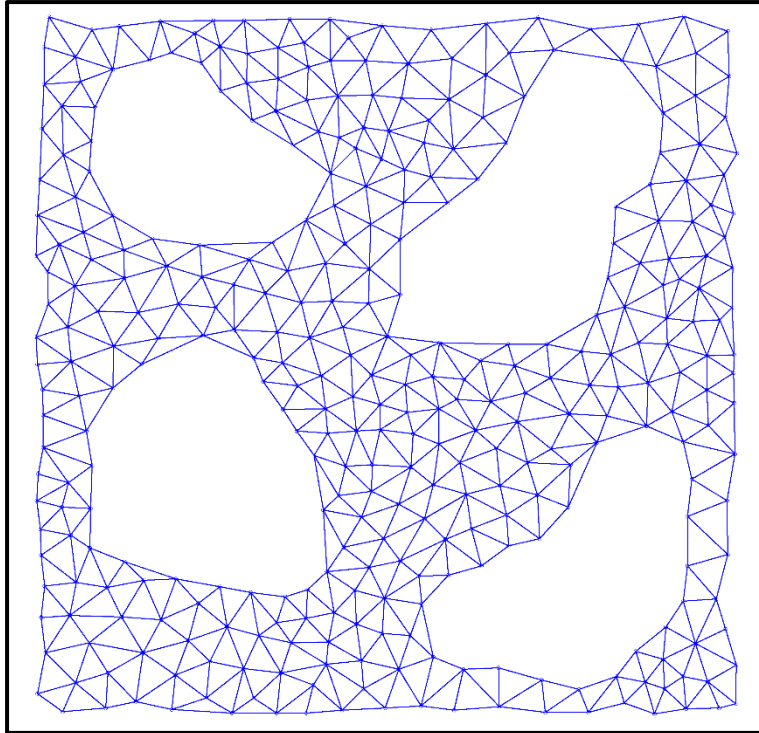
Το εμβαδόν της περιοχής μελέτης προσδιορίστηκε με μη αυτοματοποιημένη διαδικασία εκτός του λογισμικού, υπολογίζοντας το εμβαδόν των 4 εκτάσεων και αφαιρώντας το από το συνολικό εμβαδόν της έκτασης.



Σχήμα 4.23: Χωροθέτηση σε περιοχή με 4 κενές ζώνες, με $R=30m$, $N=350$ και $\rho=20$

Σε ότι αφορά στη γεωμετρική αξιολόγηση του δικτύου, για να αποφευχθεί η δημιουργία τριγώνων με μη επιθυμητές ακμές (τρίγωνα εντός των κενών περιοχών) αυτή έγινε και πάλι με εξωτερική διαδικασία. Τα τρίγωνα δεν πρέπει να διέρχονται από τις κενές περιοχές (σχήμα 4.24). Ορίσθηκαν οι γραμμές ασυνέχειας (breaklines) και τα εσωτερικά όρια και κατασκευάσθηκαν τα τρίγωνα Delaunay. Στη συνέχεια υπολογίσθηκαν τα στατιστικά μεγέθη και οι δείκτες για την περιοχή μελέτης.

Και σε αυτή την περίπτωση, η χρήση γραμμών ασυνέχειας και εσωτερικών ορίων βελτιώνει σημαντικά τους στατιστικούς δείκτες της γεωμετρικής αξιολόγησης του δικτύου, καθώς σε διαφορετική περίπτωση οι τιμές τους επηρεάζονται από τα μη επιθυμητά μεγάλα και ακανόνιστα τρίγωνα.



Σχήμα 4.24: Τριγωνισμός Delaunay σε περιοχή με κενές ζώνες

Οι στατιστικοί δείκτες που προέκυψαν από τη διαδικασία αξιολόγησης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

μέση τιμή $\bar{\sigma}_0$	8.82m
Διάμεσος $\bar{\sigma}_0$	8.46m
$\bar{\sigma}_0$ (max)	30.55m
$\bar{\sigma}_0$ (min)	0.62m
g	0.294

Πίνακας 4.3. Δείκτες αξιολόγησης δικτύου σε περιοχή με κενές ζώνες

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα - Προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Η εγκατάσταση/χωροθέτηση ασύρματων δικτύων γεωαισθητήρων, αποτελεί σήμερα ένα σημαντικό εργαλείο για ένα μεγάλο πλήθος εφαρμογών. Η βέλτιστη τοποθέτησή τους στο χώρο αποτελεί ένα θεμελιώδες πρόβλημα για την ορθή και οικονομικότερη εκμετάλλευσή τους.

Τέτοια δίκτυα, όπως για παράδειγμα δίκτυα γεωαισθητήρων για ανίχνευση μικρομετακινήσεων ή ανίχνευσης δασικών πυρκαγιών, αποτελούνται κατά κανόνα από χιλιάδες κόμβους (αισθητήρες).

Λόγω του εκτεταμένου πεδίου των εφαρμογών αυτών και του μεγάλου αριθμού αισθητήρων, είναι πρακτικά αδύνατο οι θέσεις τοποθέτησης των αισθητήρων να είναι διατεταγμένες στην ιδανική γεωμετρία, δηλαδή στις κορυφές ενός κανάβου ισοπλευρών τριγώνων, αλλά πρέπει να ανήκουν σε ένα αρχικό σύνολο σημείων, τα οποία είναι τυχαία κατανομημένα στο χώρο.

Με γνώμονα την ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης και συντήρησης του δικτύου, ζητούνται οι καλύτερες θέσεις αυτών, μεταξύ των υποψηφίων θέσεων τοποθέτησης, ώστε να επιτυγχάνεται η πλήρης κάλυψη της περιοχής με γεωμετρία που να πλησιάζει όσο είναι δυνατόν την ιδανική (ισόπλευρα τρίγωνα).

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη μιας νέας μεθοδολογίας και λογισμικού χωροθέτησης και αξιολόγησης της χωροθέτησης ασύρματων δικτύων γεωαισθητήρων.

Οι πρωτοτυπίες που παρουσιάζει η προτεινόμενη μεθοδολογία αφορούν στον τρόπο προσέγγισης και αντιμετώπισης του προβλήματος, με βασικό κριτήριο την επίτευξη ιδανικής γεωμετρίας. Συγκεκριμένα:

- Πραγματοποιείται η σύνθεση μιας ολοκληρωμένης διαδικασίας χωροθέτησης ασύρματων δικτύων αισθητήρων και γεωαισθητήρων, αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα της **κεντροειδούς διαμέρισης Voronoi (CVT)**.
- Το πρόβλημα δεν προσεγγίζεται με κάποιον ευρετικό αλγόριθμο, αλλά με εφαρμογή μεθόδων υπολογιστικής γεωμετρίας, που εξασφαλίζουν ότι ο κάθε αισθητήρας τοποθετείται όσο το δυνατόν πιο μακριά από τους γειτονικούς του.

- Η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιείται για πρώτη φορά σε προβλήματα γεωγραφικής κάλυψης ασύρματων δικτύων αισθητήρων και γεωαισθητήρων με περιορισμούς ως προς τη θέση εγκατάστασης.
- Αναπτύσσεται ολοκληρωμένη μεθοδολογία αξιολόγησης κάθε λύσης χωροθέτησης, στο κατά πόσο αυτή προσεγγίζει την ιδανική/επιθυμητή γεωμετρία, για τις συγκεκριμένες παραμέτρους που δίνονται σε κάθε πρόβλημα. Η αξιολόγηση επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μεθόδους υπολογιστικής γεωμετρίας (**τριγωνισμός Delaunay**).
- Στο πλαίσιο της μεθοδολογίας αξιολόγησης, δημιουργείται και προτείνεται συγκεκριμένη μετρική για την αξιολόγηση του δικτύου.
- Συντάσσεται λογισμικό σε περιβάλλον Matlab, το οποίο ενσωματώνει τις παραπάνω λειτουργίες χωροθέτησης και αξιολόγησης της λύσης. Το λογισμικό έχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:
 - Παρέχει δυνατότητα πλήρους παραμετροποίησης των επιλογών για την εύρεση της βέλτιστης κάθε φορά λύσης
 - Επιτρέπει την επεξεργασία τόσο πραγματικών, όσο και τυχαίων δεδομένων που έχουν προκύψει από προσομοίωση.
 - Στην περίπτωση των πραγματικών δεδομένων, αν αυτά αναφέρονται στο σύστημα της προβολής ΕΓΣΑ 87', δίνεται η δυνατότητα απεικόνισής τους, σε λογισμικό Google Earth.
 - Τέλος παρέχεται το χρήστη η δυνατότητα επιλογής, να επιλέξει χειροκίνητα επιπλέον θέσεων τοποθέτησης αισθητήρων, συμπληρωματικά, πέραν των προτεινόμενων.

5.1.1 Η μεθοδολογία χωροθέτησης

Η ολοκληρωμένη διαδικασία για τη χωροθέτηση κόμβων σε ένα ασύρματο δίκτυο γεωαισθητήρων έχει τα εξής πλεονεκτήματα και χαρακτηριστικά:

- Βασίζεται σε εργαλεία και μεθόδους της υπολογιστικής γεωμετρίας. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιείται η κεντροειδής διαμέριση Voronoi (centroidal Voronoi tessellation) και ο προσδιορισμός του εγγύτερου γείτονα (nearest neighbor search). Έτσι είναι δυνατή η άμεση υλοποίησή της με κατάλληλο λογισμικό.

- Η περιοχή μελέτης μοντελοποιείται ως ένα πολύγωνο και οι θέσεις εγκατάστασης ως σημεία εντός αυτής. Έτσι το πρόβλημα γίνεται γεωμετρικό και είναι ευκολότερη η σύνταξη λογισμικού υπολογισμού σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.
- Η διαδικασία υλοποιείται σε δύο στάδια:
 - Αρχικά προσδιορίζονται οι ιδανικές θεωρητικές θέσεις εγκατάστασης. Η κεντροειδής διαμέριση Voronoi, εξασφαλίζει ότι κάθε θέση εγκατάστασης απέχει όσο το δυνατόν περισσότερο από τις γειτονικές της.
 - Στη συνέχεια από αυτές τις θεωρητικές θέσεις προκύπτουν οι πραγματικές, προσδιορίζοντας το πλησιέστερο υπαρκτό σημείο, εφ' όσον για την τοποθέτηση των αισθητήρων ισχύουν περιορισμοί ως προς τις θέσεις εγκατάστασης.
- Η διαδικασία χωροθέτησης μπορεί να σταματήσει στο πρώτο στάδιο και οι αισθητήρες να τοποθετηθούν στις θέσεις που προκύπτουν από αυτό. Αν δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός εγκατάστασης σε συγκεκριμένες θέσεις, η μεθοδολογία παρέχει λύση και σε απλούστερα προβλήματα χωροθέτησης.
- Για τον αριθμό των αισθητήρων που προτείνεται να εγκατασταθούν, εξασφαλίζεται ότι οι όμοροι αισθητήρες απέχουν μεταξύ τους τη μέγιστη απόσταση για:
 - τη δεδομένη κατανομή των σημείων στην περιοχή μελέτης και
 - τα συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα (εμβέλεια ανίχνευσης φαινομένου)
- Οι δείκτες που προκύπτουν από τους υπολογισμούς, ολοκληρώνουν τη λύση και δίνουν τη δυνατότητα στο χρήστη να ανατροφοδοτήσει το σύστημα με νέα στοιχεία για δημιουργία νέου σεναρίου. Συγκεκριμένα:
 - ο αριθμός και το ποσοστό των σημείων της περιοχής μελέτης που δεν βρίσκονται στη ζώνη παρατήρησης κάποιου αισθητήρα
 - ο αριθμός και το ποσοστό των σημείων της περιοχής μελέτης που βρίσκονται στην εποπτεία 2 ή περισσότερων αισθητήρων (αυξάνοντας την εφεδρεία/αξιοπιστία του δικτύου).

- Η εξαγωγή των τελικών συντεταγμένων των προτεινόμενων θέσεων γίνεται σε μορφή αρχείου ASCII. Έτσι μπορούν να αξιοποιηθούν και να εισαχθούν σε λογισμικά CAD ή GIS.

5.1.2 Η μεθοδολογία αξιολόγησης

Η μεθοδολογία για την αξιολόγηση της λύσης χωροθέτησης των κόμβων ενός ασύρματου δικτύου γεωαισθητήρων που έχει προκύψει κατά το στάδιο της χωροθέτησης, έχει τα εξής πλεονεκτήματα και χαρακτηριστικά:

- Βασίζεται σε εργαλεία και μεθόδους της υπολογιστικής γεωμετρίας (Τριγωνισμός Delaunay). Έτσι είναι δυνατή η άμεση υλοποίησή της σε λογισμικό.
- Ως μέτρο σύγκρισης τίθεται η ιδανική γεωμετρική κάλυψη του χώρου, δηλαδή ένα πλέγμα κανονικού τριγωνικού κανάβου, αποτελούμενου από ισόπλευρα τρίγωνα, πλευράς ίσης με την ακτίνα ανίχνευσης, R_s , του αισθητήρα. Όλα τα δημιουργούμενα σενάρια συγκρίνονται με αυτό.
- Ως μετρική, $g = \bar{\sigma}_0 / R_s$, ορίζεται ο λόγος της μέσης τιμής του τυπικού σφάλματος, $\bar{\sigma}_0$, της απόκλισης των πλευρών κάθε τριγώνου από το ισόπλευρο τρίγωνο, προς την εμβέλεια ανίχνευσης του αισθητήρα. Η παραπάνω μετρική:
 - λαμβάνει υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τριγώνων Delaunay που σχηματίζουν οι τελικές προτεινόμενες θέσεις.
 - είναι ανεξάρτητη από τη θέση ή τον προσανατολισμό των τριγώνων.
 - επιτρέπει τη σύγκριση πλεγμάτων τριγώνων, που έχουν δημιουργηθεί σε σενάρια με ίδια ή διαφορετική εμβέλεια αισθητήρων.
 - είναι μοναδική για κάθε σενάριο και καθιστά άμεσα συγκρίσιμα τα διαφορετικά σενάρια που προκύπτουν.
- Οι στατιστικοί δείκτες της κάθε λύσης υπολογίζονται ταυτόχρονα με τον υπολογισμό της μετρικής καταδεικνύουν και σε αυτό το στάδιο την ανάγκη για αύξηση ή μείωση του αριθμού των αισθητήρων. Συγκεκριμένα υπολογίζονται:
 - η τυπική απόκλιση, σ_0 , της μέσης τιμής των πλευρών κάθε τριγώνου που προκύπτει κατά τον τριγωνισμό Delaunay

- ο μέσος όρος, της τυπικής απόκλισης της μέσης τιμής των πλευρών όλων των τριγώνων, $\bar{\sigma}_0 = \frac{\sum \sigma_0}{n}$
- η διάμεσος της τυπικής απόκλισης της μέσης τιμής των πλευρών του τριγώνου
- η μέγιστη (max) και η ελάχιστη (min) τιμή της τυπικής απόκλισης της μέσης τιμής των πλευρών του τριγώνου

Από τη μελέτη των δεικτών αυτών εντοπίζονται στην περιοχή μελέτης, τα τρίγωνα (ή οι περιοχές) στα οποία παρουσιάζεται πρόβλημα. Για παράδειγμα τρίγωνα με μεγάλες αποκλίσεις στο μέγεθος των πλευρών τους, ώστε αν ο χρήστης το επιθυμεί να επέμβει αποκλειστικά σε αυτά. Πιο συγκεκριμένα:

- η τυπική απόκλιση, σ_0 , της μέσης τιμής των πλευρών κάθε τριγώνου, παρέχει στο χρήστη μια συνολική εικόνα σχετικά με το πόσο καλά προσεγγίζει κάθε τρίγωνο, το ισόπλευρο τρίγωνο.
- ο μέσος όρος, της τυπικής απόκλισης της μέσης τιμής των πλευρών όλων των τριγώνων, παρέχει στην πληροφορία, σχετικά με το πόσο καλά προσεγγίζει το τυχαίο πλέγμα, τον τριγωνικό κάναβο.
- η διάμεσος είναι πιο αντιπροσωπευτική από το μέσο όρο, αν υπάρχουν λίγες ακραίες τιμές στο σύνολο, καθώς είναι η τιμή, η οποία είναι μικρότερη ή ίση από το 50% των αριθμών του συνόλου και μεγαλύτερη ή ίση από το 50% των αριθμών του συνόλου.
- η μέγιστη (max) τιμή της τυπικής απόκλισης προσδιορίζει την ύπαρξη τριγώνων στο πλέγμα, τα οποία δημιουργούν κακή γεωμετρία
- η ελάχιστη (min) τιμή της τυπικής απόκλισης είναι επιθυμητό να βρίσκεται κοντά στο μηδέν, καθώς αποδεικνύει ότι υπάρχει τουλάχιστον ένα τρίγωνο με γεωμετρία που προσεγγίζει το ισόπλευρο τρίγωνο.

Επιπλέον σχεδιάζονται το αντίστοιχο ιστόγραμμα συχνοτήτων και σχετικών συχνοτήτων, ώστε να προκύπτει η κατανομή που ακολουθούν οι τυπικές αποκλίσεις. Προφανώς όταν οι τυπικές αποκλίσεις παρουσιάζουν συγκέντρωση σε μικρές τιμές, αυτό σημαίνει ότι περισσότερα τρίγωνα έχουν πλευρές που πλησιάζουν τα ισόπλευρα τρίγωνα, άρα και η γεωμετρία που δημιουργείται προσομοιάζει καλύτερα την ιδανική.

5.1.3 Συμπεράσματα από την προσομοίωση

Για τον έλεγχο της συμπεριφοράς του αλγορίθμου δημιουργήθηκαν διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης, με:

- διαφορετική πυκνότητα σημείων
- διαφορετική εμβέλεια αισθητήρων
- διαφορετικό αριθμό αισθητήρων

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτουν τα παρακάτω:

- Η αύξηση των αισθητήρων πάνω από έναν οριακό αριθμό δεν οδηγεί σε σημαντική αύξηση της κάλυψης.
- Η αύξηση του αριθμού των αισθητήρων, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του δείκτη g, γεγονός που συνεπάγεται την καλύτερη προσαρμογή του τυχαίου πλέγματος τριγώνων στον κάναβο ισοπλεύρων τριγώνων.
- Η αύξηση της πυκνότητας των σημείων στην περιοχή μελέτης, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του δείκτη g.

Ακολουθώντας τη μεθοδολογία αξιολόγησης της χωροθέτησης του δικτύου, προκύπτει ότι:

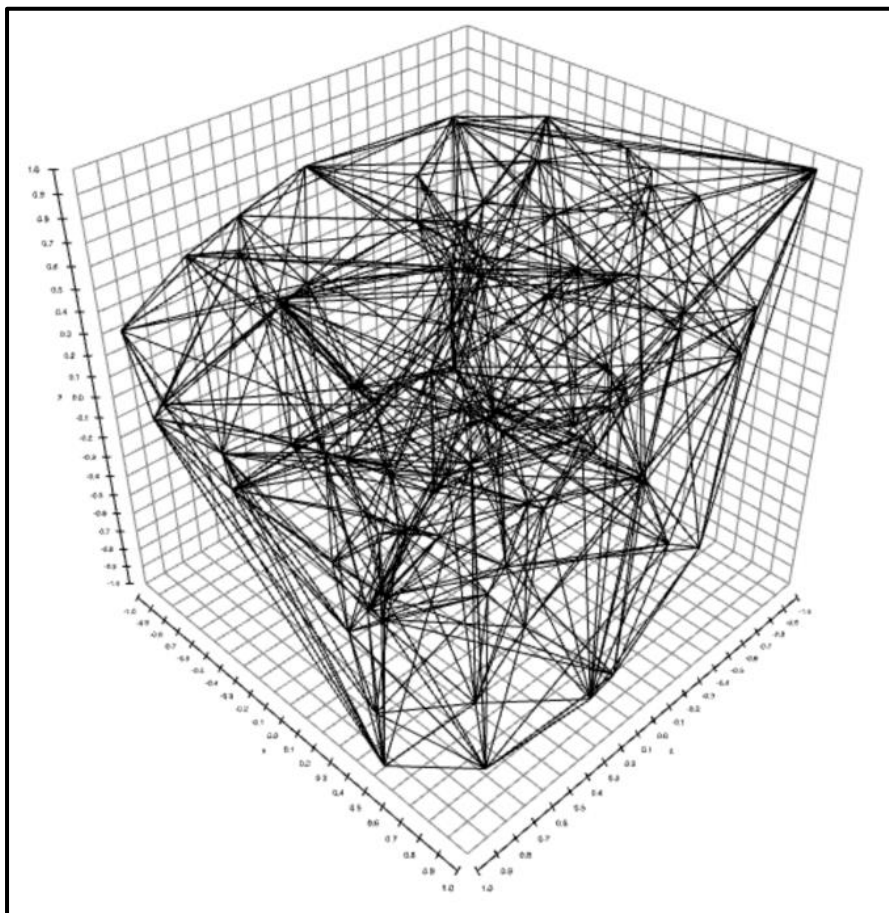
- η χωροθέτηση σε περιοχές υψηλής χωρικής πυκνότητας με το μεγαλύτερο δυνατό αριθμό αισθητήρων, δίνει καλύτερη προσαρμογή στην ιδανική γεωμετρία, δηλαδή στον κάναβο ισοπλεύρων τριγώνων.
- Αντιθέτως, η χωροθέτηση αισθητήρων σε περιοχές με χαμηλή χωρική πυκνότητα σημείων, επιτυγχάνει μεν, υψηλά ποσοστά κάλυψης, αλλά όχι απαραίτητα και ιδανική γεωμετρία.
- Ο αλγόριθμος δίνει λύση στη χωροθέτηση αισθητήρων ακόμα και σε περιοχές με ιδιαίτερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα, χωροθέτηση εντός ζώνης επιρροής (buffer zone) ή σε περιοχή με μεγάλα ή διάσπαρτα κενά εντός αυτής.
- Σε περιοχές με ιδιαίτερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά:
 - δεν υπολογίζεται αυτοματοποιημένα, εντός του αλγορίθμου, το ωφέλιμο εμβαδόν της περιοχής μελέτης, αλλά γίνεται με εξωτερική διαδικασία, χρησιμοποιώντας λογισμικό ηλεκτρονικής σχεδίασης (CAD).

- Αντίστοιχα με εξωτερική διαδικασία γίνεται και η αξιολόγηση, ορίζοντας γραμμές ασυνέχειας (breaklines) και εσωτερικά όρια.

5.2 Προτάσεις

Με την ολοκλήρωση της διατριβής και της εμπειριστατωμένης μελέτης του προβλήματος της χωροθέτησης αισθητήρων, προέκυψαν οι παρακάτω προτάσεις περαιτέρω διερεύνησης, που θα συμβάλλουν στη βελτίωση της μεθοδολογίας και την εξέλιξη της έρευνας στο αντικείμενο αυτό.

Όπως αναφέρθηκε, η κεντροειδής διαμέριση Voronoi (CVT), μπορεί να γενικευθεί για οποιοδήποτε χώρο και μετρική και όχι απαραίτητα μόνο για τις δύο διαστάσεις και την Ευκλείδεια απόσταση. Για το λόγο αυτό, προτείνεται να διερευνηθεί η εφαρμογή του αλγόριθμου και για την αντίστοιχη διαδικασία χωροθέτησης στο χώρο των τριών διαστάσεων (σχήμα 5.1), ή/και χρησιμοποιώντας την δικτυακή απόσταση.



Σχήμα 5.1: Τριγωνισμός Delaunay το χώρο των τριών διαστάσεων

Με την επέκταση της μεθοδολογίας των CVT στη βελτιστοποίηση της δικτυακής επικοινωνίας, μπορεί να δημιουργηθεί ένα ενιαίο λογισμικό για την αντιμετώπιση του προβλήματος, ώστε να παρέχεται η τελική λύση που είναι ιδανική τόσο από άποψη χωρικής κάλυψης, όσο και από δικτυακής κάλυψης.

Υπάρχουν εφαρμογές όπου δεν αρκεί η παρατήρηση του φαινομένου στο χώρο των δύο διαστάσεων, αλλά επιβάλλεται η χωροθέτηση των αισθητήρων να γίνεται στο χώρο των τριών διαστάσεων. Στην περίπτωση αυτή ο αισθητήρας βρίσκεται στο κέντρο μιας σφαίρας ακτίνας R και από την εφαρμογή της κεντροειδούς διαμέρισης Voronoi αντί για πολύγωνα, προκύπτουν πολύεδρα. Προτείνεται, λοιπόν, η εξέλιξη του αλγορίθμου, ώστε να είναι δυνατή η χωροθέτηση αισθητήρων και η αντίστοιχη διαδικασία αξιολόγησης στο χώρο των τριών διαστάσεων.

Η ανάπτυξη της παρούσας μεθοδολογίας βασίζεται στην ύπαρξη ενός αρχικού συνόλου σημείων, τα οποία και αποτελούν τις υποψήφιες θέσεις τοποθέτησης των αισθητήρων. Τα δεδομένα αυτά μπορεί να προέρχονται είτε από μετρήσεις πεδίου, είτε κυρίως από συλλογή δεδομένων με φωτογραμμετρικές ή/και τηλεπισκοπικές μεθόδους. Πολύ σημαντική θα ήταν η περεταίρω αυτοματοποίηση της διαδικασίας, ώστε αντί ως στοιχείο εισόδου στον αλγόριθμο χωροθέτησης να δίνεται το αρχείο με τις συντεταγμένες των σημείων, αυτές να προκύπτουν απευθείας από την επεξεργασία ενός ορθοφωτοχάρτη ή μιας γεωαναφερμένης δορυφορικής εικόνας.

Επίσης στην περίπτωση που δεν είναι αυτοσκοπός η βέλτιστη κάλυψη του δικτύου, αλλά το ενδιαφέρον εστιάζεται σε συγκεκριμένα κρίσιμα σημεία, ενδιαφέρον θα ήταν να διερευνηθεί η επέκταση της μεθοδολογίας με απόδοση διαφορετικού βάρους στα σημεία. Το βάρος μπορεί να ορίζεται ανάλογα με τη μέθοδο συλλογής των σημείων (ακρίβεια συντεταγμένων) ή με κάποιο άλλο κριτήριο (π.χ. μεγαλύτερο βάρος σε σημεία που βρίσκονται σε ζώνες υψηλότερης επικινδυνότητας). Η λύση σε αυτή την περίπτωση δεν θα οδηγήσει σε κανονικά εξάγωνα, θα είναι όμως η βέλτιστη χωρικά για τη συγκεκριμένη απόδοση βαρών.

Σε ότι αφορά στην αναβάθμιση του λογισμικού προτείνεται:

- να ενσωματωθούν οι λειτουργίες υπολογισμού του εμβαδού για τις ειδικές περιπτώσεις που μελετήθηκαν στην εργασία αυτή ή όποιες άλλες προκύψουν.
- να δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής γραμμών ασυνέχειας και εσωτερικών ορίων, για να μην απαιτούνται εξωτερικές διαδικασίες επεξεργασίας κατά τη διαδικασία της αξιολόγησης.

Τέλος, προτείνεται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε να υιοθετηθεί από τους αρμόδιους φορείς για την εποπτεία και παρακολούθηση του φυσικού περιβάλλοντος, σε περιπτώσεις ανίχνευσης πυρκαγιάς, ανίχνευσης μετακινήσεων, ή άλλων εφαρμογών που χρησιμοποιούνται ασύρματα δίκτυα γεωαισθητήρων.

Βιβλιογραφία

- Aitsaabi, N., Achir, N., Boussetta, K., & Pujolle, G. (2008). Heuristic Deployment to Achieve Both Differentiated Detection and Connectivity in WSN. *Vehicular Technology Conference*. IEEE.
- Akyildiz, I., Weilian, S., Erdal, C., & Sankarasubramaniam, Y. (2002). A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, σσ. 104-112.
- Alkathami, M. (2015, 03). Overview of Border Control Using Wireless Sensor Network. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 6, Issue 3.
- Alkhatib, A. (2013, 11). Wireless sensor network for forest fire detection and decision making, vol. 2 num.3. *International Journal of Advances in Engineering Science and Technology*.
- Ardalan, A., & Jafari, M. (2012, 01). Multi-sensor approach to settlement analysis of earth dams. *Computational geosciences*, σσ. 123-138.
- Argany, M., Mostafavi, M., & Karimipour, F. (2011). A GIS Based Wireless Sensor Network Coverage Estimation and Optimization: A Voronoi Approach. Στο *Transactions on Computational Science XIV* (σσ. 151-172). Springer Berlin Heidelberg.
- Bencini, L., Di Palma, D., Collodi, G., Manes, A., & Manes, G. (2010). Wireless sensor networks for on-field agricultural management process. Στο G. Merrett, & Y. Tan, *Wireless Sensor Networks: Application - Centric Design*. InTech.
- Bolourchi, P., & Uysal, S. (2013). Forest Fire Detection in Wireless Sensor Network Using Fuzzy Logic. *5th International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks (CICSyN)*. Madrid: IEEE.
- Bolstad, W. (2007). *Introduction to Bayesian statistics (2nd edition)*. New Jersey: John Wiley and Sons, inc.
- Brkovic, M., & Sretovic, V. (2012). Urban Sensing - Smart solutions for monitoring enviromental quality: Case studies from Serbia. *48th ISOCARP Congress*. Perm.
- Burns, J. (2009). Centroidal voronoi tessellations.

- Chazelle, B., & CG Impact Task Force. (1996). *Application Challenges to Computational Geometry: CG Impact Task Force Report*.
- Chizari, H., Hosseini, M., & Poston, T. (2011, 11). Delaunay triangulation as a new coverage measurement method in wireless sensor network. *Sensors*, *σσ*. 3163-3176.
- Chmelina, K., & Kahmen, H. (2003). Combined Evaluation of Geodetic and Geotechnical Data during Tunnel Excavation by Use of a Knowledge-Based System. *International Association of Geodesy IAG General Assembly, Symposium G01* (*σσ*. 105-110). Saporò: IAG.
- Chong, C.-Y., & Kumar, S. (2003). Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges. *Proceedings of the IEEE* (*Volume: 91, Issue: 8*) (*σσ*. 1247 - 1256). IEEE.
- Clark, P., & Evans, F. (1955, 03 18). On some aspects of spatial pattern in biological populations. *Science*, *σσ*. 397-398.
- Cormen, T., Leiserson, C., Rivest, R., & Stein, C. (2009). *Introduction to Algorithms, Third Edition*. MIT Press.
- D' Amato, F., Gamba, P., & Goldoni, E. (2012). Monitoring Heritage Buildings and Artworks with wireless sensor networks. *IEEE Workshop on Environmental Energy and Structural Monitoring Systems (EESMS)*. Perugia: IEEE.
- Dagar, A., & Saroha, V. (2013, 4). An Efficient Coverage Scheme for Wireless Sensor Network. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*.
- Danisch, L., Chrzanowski, A., Bond, J., & Bazanowski, M. (2008). Fusion of geodetic and MEMS sensors for integrated monitoring and analysis of deformations. *13th FIG Symposium on deformation measurement and analysis*. Lisbon: FIG.
- Dargie, W., & Poellabauer, C. (2010). *Fundamentals of Wireless Sensor Networks. Theory and practise*. West Sussex: John Wiley and sond Ltd.
- Dasarathy, B. (1990). *Nearest Neighbor: Pattern Classification Techniques*. IEEE Computer Society Press.
- de Berg, M., Cheong, O., van Kreveld, M., & Overmars, M. (2008). *Computational Geometry, Algorithms and Applications*. Berlin: Springer.

- de Oliveira, S. (2012). A Review on Delaunay Refinement Techniques. *12th international conference on Computational Science and Its Applications* (σσ. 172-187). Springer-Verlag.
- Devadoss, S., & O' Rourke, J. (2011). *Discrete and computational Geometry*. New Jersey: Princeton University Press.
- Devaraj, A. (2015). Mesh Simplification in Wireless Sensor Networks Using INRCDS. *4th International Conference on Circuits, Systems*, (σσ. 179-184). Kuala Lumpur: WSEAS Press.
- Di Mauro, M., & Van Cravenbroeck, J. (2012). Geodetic and Geotechnical Combined Monitoring Concept. *FIG Working Week 2012*. Rome.
- Djurisic, M., Tafa, Z., Dimic, G., & Milutinovic, V. (2012). A survey of military applications of wireless sensor networks. *Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*. IEEE.
- Du, Q., & Gunzberger, M. (2002, 12). Grid generation and optimization based on centroidal Voronoi tessellations. *Applied Mathematics and Computation, Volume 133, Issues 2-3*, σσ. 591-607.
- Du, Q., & Wang, D. (2003, 03). Tetrahedral mesh generation and optimization based on cendroidal voronoi tessellation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, σσ. 1355-1373.
- Du, Q., & Wang, D. (2005). The Optimal Centroidal Voronoi Tessellations and the Gersho's Conjecture in the Three-Dimensional Space. *Computers and Mathematics with Applications*.
- Du, Q., Emelianenko, M., & Ju, L. (2006, 02 08). Convergence of the Lloyd Algorithm for Computing Centroidal Voronoi Tessellations. *SIAM (Society for Industrial and Apllied Mathematics)*, σσ. 102-119.
- Du, Q., Faber, V., & Gunzburger, M. (1999). Centroidal Voronoi Tessellations: Applications and Algorithms. *SIAM Review*, σσ. 637-676.
- Erol, B. (2010, 12). Evaluation of High-Precision Sensors in Structural Monitoring. *Sensors*.
- Faludi, R. (2011). *Building Wireless Sensor Networks*. Sebastopol: O' Reilly Media Inc.
- Felemban, E. (2013, 05). Advanced Border Intrusion Detection and Surveillance Using Wireless Sensor Network Technology. *International*

Journal of Communications, Network and System Sciences, Vol. 6 No. 5, σσ. 251-259.

- Garcia, M., Bri, D., Sendra, S., & Lloret, J. (2010). Practical Deployments of Wireless Sensor Networks: a Survey. *International Journal on Advances in Networks and Services, vol 3 no 1 & 2.*
- Gilat, A. (2011). *MATLAB: An Introduction with Applications 4th Edition.* Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc.
- Han, J., & Kamber, M. (2006). *Data mining: Concepts and techniques (second edition).* San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers.
- Hateley, J., Wei, H., & Chen, L. (2015, 04). Fast Methods for Computing Centroidal Voronoi Tessellations. *Journal of Scientific Computing, Volume 63, Issue 1, σσ. 185-212.*
- Heinrichs, K., & Azzam, R. (2012, 06). Investigation of Salt Weathering on Stone Monuments by Use of a Modern Wireless Sensor Network Exemplified for the Rock-Cut Monuments in Petra/Jordan – A Research Project (2010 – 2013). *International Journal of Heritage in the Digital Era, Vol 1, Issue 2, σσ. 191-215.*
- Hejlová, V., & Voženílek, V. (2013, 5). Wireless Sensor Network Components for Air Pollution Monitoring in the Urban Environment: Criteria and Analysis for Their Selection. *Wireless Sensor Network, σσ. 229-240.*
- Henriques, M., Lima, J., & Oliveira, S. (2012). Measuring Inclinations in Cabril Dam with an Optoelectronic Sensor. *FIG Working Week 2012. Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage.* Rome: FIG.
- Hill, C., & Sippel, K. (2002). Modern Deformation Monitoring: A Multi Sensor Approach. *FIG XXII International Congress.* Washington: FIG.
- Hill, J. (2003). *System Architecture for Wireless Sensor Networks.* Berkeley: University of California.
- Hoffmann, M., Kettner, L., & Naher, S. (2004). Two dimensional geometry libraries: LEDA and CGAL. Στο J. Goodman, & J. O'Rourke, *Handbook of Discrete and Computational Geometry, Second Edition* (σσ. 1435–1464). Chapman and Hall/CRC.
- Iliodromitis, A., Pantazis, G., & Vescoukis, V. (2017). 2D Wireless Sensor Network Deployment Based on Centroidal Voronoi Tessellation.

International Conference on Applied Mathematics and Computer Science. Rome.

Jagla, E., & Rojo, A. (2002, 02). Sequential fragmentation: the origin of columnar quasihexagonal patterns. *Physical Review E*, vol. 65, Issue 2.

Joswig, M., & Theobald, T. (1998). *Polyhedral and algebraic methods in computational geometry*. Wiesbaden: Springer.

Karpis, O. (2013, 03). Wireless Sensor Networks in Intelligent Transportation Systems. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, σσ. 611-617.

King, L. (1962). A quantitative expression of the pattern of urban settlements in selected areas of the United States. *Tidjschrift voor Economische en Sociale Geographie*, σσ. 1-7.

Klee, V. (1969, 02). Is Every Polygonal Region Illuminable From Some Point? *The American Mathematical Monthly* .

Klopper, M., & Simonis, I. (2009). *SANY; An open service architecture for sensor networks*.

Knuth, D. (2016). *The Art of Computer Programming, Volume 4, Fascicle 6*. Boston: Pearson Education Inc.

Kolega, E., & Vescoukis, V. (2013). Efficient WSN infrastructures for large environmental area monitoring. *Intelligent Monitoring, Control and Security of Critical Infrastructure Systems (IntelliCIS), 8th Workshop*. Aachen.

Kolega, E., Vescoukis, V., & Douligieris, D. (2010). Forest Fire Sensing and Decision Support using Large Scale WSNs. *International Congress on Environmental Modeling and Software (iEMSs)*. Ottawa, Ontario.

Laint, C. (2013). *Learning to Program with MATLAB: Building GUI Tools, 1st Edition*. Hoboken, NJ: Wiley & Sons Inc.

Leica Geosystems. (2010). *Online Help: Leica GeoMoS v5.1*. Heerbrugg: Leica Geosystems AG.

Lewis, F. (2004). Wireless sensor Networks. *Smart Environments: Technologies, Protocols, and Applications*. New York.

Libelium. (2013). *Waspote GPS Programming guide*. Libelium.

- Liebling, T., & Pournin, L. (2012). Voronoi Diagrams and Delaunay Triangulations: Ubiquitous Siamese twins. *Optimization Stories: Documenta Mathematica Extra Volume*, σσ. 419-431.
- Lienhart, W., & Brunner, F. (2003). Monitoring of bridge deformations using embedded fiber optical sensors. *11th International Symp. on Deformation Measurements* (σσ. 555-561). Santorini: FIG.
- Lloyd, S. (1982, 03). Least squares quantization in PCM. *IEEE Transactions on Information Theory*, σσ. 129–137.
- Lynch, J., & Loh, K. (2006, 03). A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor. *The Shock and Vibration Digest*, σσ. 91-128.
- Maraiya, K., Kant, K., & Gupta, N. (2011, 5). Application based study on wireless sensor network. *International Journal of Computer Applications, Vol. 21*.
- Meade, M. S. (1980). *Conceptual and methodological issues in medical geography*. Chapel Hill, N.C: University of North Carolina at Chapel Hill, Dept. of Geography.
- Mecocci, A., & Abrardo, A. (2014, 01 03). Monitoring Architectural Heritage by Wireless Sensors Networks: San Gimignano — A Case Study. *Sensors*, σσ. 770-778.
- Nack, F. (2009). *An Overview on Wireless Sensor Networks*. Ανάκτηση από http://www.mi.fu-berlin.de/inf/groups/ag-tech/teaching/2008-09_WS/S_19565_Proseminar_Technische_Informatik/nack09vverview.pdf.
- Nellore, K., & Hancke, G. (2016, 01). A Survey on Urban Traffic Management System Using Wireless Sensor Networks. *Sensors*.
- Nittel, S. (2009, 07 15). A survey of geosensor networks: Advances in dynamic enviromental monitoring. *Sensors*.
- Ojha, T., Misra, S., & Raghuwanshi, N. (2015, 10). Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. *Computers and Electronics in Agriculture, vol. 18*, σσ. 66-84.
- Oliveira, L., & Rodrigues, J. (2011, 04). Wireless Sensor Networks: a Survey on Environmental Monitoring. *Journal of Communications*, σσ. 143-151.

- Pannell, D. (1996). Sensitivity analysis of normative economic models: theoretical framework and practical strategies. *Agricultural Economics, Volume 16, Issue 2*, (σσ. 139–152).
- Rizzi, A., Voltolini, F., Girardi, S., Lorenzo, G., & Remondino Fabio. (2007). Digital preservation, documentation and analysis of paintings, monuments and large cultural heritage with infrared technology, digital cameras and range sensors. *XXI International CIPA Symposium*. Athens.
- Saltelli, A. (2002, 06). Sensitivity Analysis for Importance Assessment. *Risk analysis, Volume 22, Issue 3*, σσ. 579–590.
- Shakkottai, S., Srikant, R., & Shroff, N. (2003). Unreliable sensor grids: Coverage, connectivity and diameter. *22nd Annual Joint Conference on the IEEE Computer and Communications Societies*, (σσ. 1073-1083). San Francisco.
- Sharma, D., Verma, S., & Sharma, K. (2013, 04 03). Network Topologies in Wireless Sensor Networks: A Review. *International Journal of Electronics & Communication Technology*.
- Silicon Labs. (2013). *The Evolution of Wireless Sensor Networks*. Ανάκτηση από <http://www.silabs.com/>.
- Song, G., Zhou, Y., Ding, F., & Song, A. (2008, 8). A mobile sensor network system for monitoring of unfriendly environments. *Sensors*, σσ. 7259-7274.
- Stillman, M., Takayama, N., & Verschelde, J. (2008). *Software for Algebraic Geometry*. New York: Springer.
- Taylor, P. (1977). *Quantitative Methods in Geography: Introduction to Spatial Analysis*. London: Houghton - Mifflin Co.
- Toumpis, S., & Tassiulas, L. (2006, July 05). Optimal deployment of large wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, σσ. 2935 - 2953.
- Vieira, M., Vieira, L., & et al. (2003). Scheduling nodes in wireless sensor networks: a Voronoi approach. *Local Computer Networks, 2003. LCN '03. Proceedings. 28th Annual IEEE International Conference* (σσ. 423 - 429). IEEE.
- Vu, C., & Li, Y. (2009). Delaunay-triangulation based complete coverage in wireless sensor networks. *Pervasive Computing and Communications*,

2009. *PerCom 2009. IEEE International Conference* (σσ. 1 - 5). Galveston, TX: IEEE.
- Wang, J., & Medidi, S. (2007). Energy Efficient Coverage with Variable Sensing Radii in Wireless Sensor Networks. *Third IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob 2007)* (σ. 61). White Plains, NY: IEEE.
- Wang, Q., & Balasingham, I. (2010). *Wireless Sensor Networks - An introduction*.
- Wang, Y.-C., Hu, C.-C., & Tseng, Y.-C. (2005). Efficient deployment algorithms for ensuring coverage and connectivity of wireless sensor networks. *First International Conference on Wireless Internet (WICON'05)* (σσ. 114 - 121). IEEE.
- Wen, Y., Pan, J., & Le. J. (2007). Survey on application of wireless sensor networks for traffic monitoring. *1st International Conference on Transportation Engineering* (σσ. 2079-2084). Chengdu, China: ASCE.
- Werner-Allen, G., Johnson, J., Ruiz, M., Lees, J., & Wlesch, M. (2005). Monitoring Volcanic Eruptions with a Wireless Sensor Network. *2nd European Workshop on wireless sensor networks*, (σσ. 108-120). Istanbul.
- Wu, C.-S., Lee, K.-C., & Chung, Y.-C. (2006). A Delaunay triangulation based method for wireless sensor network deployment. *12th International Conference on Parallel and Distributed Systems - (ICPADS'06)*. Minneapolis, MN: IEEE.
- Yick, J., Mukherjee, B., & Ghosal, D. (2008). Wireless sensor network survey. *Στο Computer Networks 52* (σσ. 2292-2330).
- Yu, L., Wang, N., & Meng, X. (2005). Real-time forest fire detection with wireless sensor networks. *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. IEEE.
- Zhang, J., & Zhou, F. (2012). Study on Optimal Regular Deployment Patterns of Wireless Sensor Network. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, σσ. 2300-2303.
- Zhou, H., Jin, M., & Wu, H. (2013). A distributed delaunay triangulation algorithm based on centroidal voronoi tessellation for wireless sensor networks. *14th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing* (σσ. 59-68). New York: ACM.

- Zhu, Y., Song, J., & Dong, F. (2011). Applications of wireless sensor network in the agriculture environment monitoring. *International Workshop on Automobile, Power and Energy Engineering*, (σσ. 608-614). Wuhan, China.
- Αργυρίου, Α. (2004). *Αισθητήρες ημιαγωγών, αισθητήρες θερμικοί, μηχανικοί, μαγνητικοί, αισθητήρες ακτινοβολίας και χημικοί αισθητήρες. Σημειώσεις μαθήματος "Αισθητήρες, μικροελεγκτές, και συστήματα συλλογής δεδομένων" στο ΔΠΜΣ "Ηλεκτρονική & Επεξεργασία της πληροφορίας"*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Αστρεϊνίδης, Ε., & Εγγλέζος, Δ. (2008). Ενόργανη παρακολούθηση παραμορφώσεων του τείχους της Ακρόπολης με αισθητήρες οπτικών ινών – Σύγκριση μετρήσεων και αναλυτικών προβλέψεων. *3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας*.
- Βερυκοκίδης, Ε. (2010). *"Εξυπνοι αισθητήρες"*. (Πτυχιακή εργασία). Ηράκλειο: ΑΤΕΙ Κρήτης.
- Δούκας, Ι. (2014). "Περί αισθητήρων, γεωαισθητήρων και των ασυρμάτων δικτύων τους. Εφαρμογές στη γεωδαισία - γεωματική". *5ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας*. Αθήνα.
- Εμίρης, Ι. (2009). *Υπολογιστική γεωμετρία: Μια σύγχρονη αλγοριθμική προσέγγιση*. Αθήνα: Κλειδάριθμος.
- ΕΜΠ - Σχολή Χημικών Μηχανικών. (2005). *Έκθεση σχετικά με τις μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης*.
- Κάβουρας, Λ. (2014). *Αλγόριθμοι για τα προβλήματα k-means και k-median (Διπλωματική εργασία)*. Αθήνα: ΣΕΜΦΕ, ΕΜΠ.
- Κατσαβρία, Α. (2011). *Γεωμετρική & Αλγοριθμική επίλυση του προβλήματος της σχεδίασης επικλινούς στέγης με δοθείσα κάλυψη*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- Κατσάνος, Ε. (2008). *Βασικά στοιχεία για τη χρήση του MATLAB & Εφαρμογή σε προβλήματα κατασκευών (Διδακτικές Σημειώσεις)*. Θεσσαλονίκη: Α.Π.Θ.
- Κολεγά, Ε. (2014). *"Πολυκριτηριακή αξιολόγηση δικτύων ασυρμάτων αισθητήρων, υψηλής χωρικής πυκνότητας για περιβαλλοντικές εφαρμογές"* (Διδακτορική Διατριβή). Αθήνα: ΣΑΤΜ, ΕΜΠ.

- Κουτάκη - Παντερμάκη, Ε. (2009). *Κατασκευή περιβαλλουσών καμπυλών για κυρτά πολυγωνικά αντικείμενα με τη βοήθεια διαγραμμάτων Voronoi (μεταπτυχιακή εργασία)*. Ηράκλειο: Πανεπιστήμιο Κρήτης.
- Κουτσόπουλος, Κ. (2002). *Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και ανάλυση χώρου*. Αθήνα: Παπασωτηρίου.
- Μανάφα, Μ. (2013). *"Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων για καταγραφή και παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων σε αστικό περιβάλλον έξυπνης πόλης"* (Διπλωματική εργασία). Αθήνα: ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ.
- Μανιδάκη, Β., Ηλιόπουλος, Θ., Παρτσινέβελος, Ι., & Λελούδας, Σ. (2010). The highly accurate topographical monitoring of predetermined points on the south and east Wall of the Acropolis. *Modern technologies in the restoration of the Acropolis* (σσ. 48-52). Αθήνα: ΥΣΜΑ-ΥΠΠΟΤ.
- Μαρκάτος, Ν.-Χ., Βεσκούκης, Β., & Κυρανούδης, Χ. (2008). Firementor: Επιχειρησιακό σύστημα σχεδιασμού και υποστήριξης αποφάσεων για διαχείριση δασικών πυρκαγιών. *Τεχνολογίες πληροφορικής και επικοινωνιών στην υπηρεσία της πρόληψης και της προστασίας του πολίτη και του οικοσυστήματος από τις δασικές πυρκαγιές. Αξιολόγηση προοπτικές*. Αθήνα: ΤΕΕ.
- Σαραφιάν, Κ. (2012). *Πειραματική διερεύνηση ψηφιακών κλισιμέτρων ακριβείας στη μελέτη ταλαντώσεων υψηλών κατασκευών ένταντι του ανέμου (Μεταπτυχιακή εργασία)*. Αθήνα.
- Τσάντας, Ν. (2007). *Προσδιοριστικές μέθοδοι Επιχειρησιακής έρευνας*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.

Ιστογραφία

<http://fiji.eecs.harvard.edu/>. (2015, 04 03).

<http://webs.cs.berkeley.edu/tos/>. (2016, 08 05).

<http://www.firesense.eu/>. (2016).

<http://www.leica-geosystems.com>. (2015, 8 10). Ανάκτηση από
http://www.leica-geosystems.com/en/Leica-GeoMoS_4802.htm.

<http://www.mathworks.com/>. (2016).

<http://www.opensense.ethz.ch/trac/>. (2016, 11 12).

<http://www.ysma.gr>. (2011).

<http://www.zigbee.org/>. (2015, 10 10).

<https://www.topconpositioning.com>. (2016). Ανάκτηση από
<https://www.topconpositioning.com/enterprise-services-and-subscriptions/remote-management-tools/topcon-tierra>.

Παράρτημα

(Αποτελέσματα προσομοίωσης)

α/α	εύρος x (m)	εύρος y (m)	Εμβαδόν (τ.μ.)	σημεία	σημεία /στρέμμα	Εμβέλεια (m)	απαιτούμενοι αισθητήρες	χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες	επαναλήψεις	σημεία εκτός	Κάλυψη (%)	τρίγωνα	σ ₀ (m)	σ ₀ /r	χρόνος (sec)
1	500	500	250000	2000	8	20	192	200	2000	158	91.65	365	8.38	0.464	147
2	500	500	250000	2000	8	20	192	210	2000	138	92.65	371	8.56	0.432	147
3	500	500	250000	2000	8	20	192	220	2000	129	93.10	403	8.01	0.403	149
4	500	500	250000	2000	8	20	192	230	2000	113	93.90	404	8.05	0.401	152
5	500	500	250000	2000	8	20	192	240	2000	80	95.55	426	8.45	0.420	157
6	500	500	250000	2000	8	20	192	250	2000	74	95.85	457	7.97	0.403	161
7	500	500	250000	2000	8	20	192	260	2000	73	96.35	468	7.70	0.390	164
8	500	500	250000	2000	8	20	192	270	2000	57	96.70	495	7.96	0.400	168
9	500	500	250000	2000	8	20	192	280	2000	56	96.75	521	7.72	0.394	172
10	500	500	250000	2000	8	20	192	290	2000	55	96.80	536	7.53	0.380	176

α/α	εύρος x (m)	εύρος y (m)	Εμβαδόν (τ.μ.)	σημεία	σημεία /στρέμμα	Εμβέλεια (m)	απαιτούμενοι αισθητήρες	χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες	επαναλήψεις	σημεία εκτός	Κάλυψη (%)	τρίγωνα	σ ₀ (m)	σ ₀ /r	χρόνος (sec)
11	500	500	250000	2000	8	30	85	90	2000	269	86.10	158	12.59	0.420	111
12	500	500	250000	2000	8	30	85	95	2000	175	90.80	163	11.37	0.379	112
13	500	500	250000	2000	8	30	85	100	2000	126	93.25	165	9.70	0.323	114
14	500	500	250000	2000	8	30	85	105	2000	130	93.05	177	9.78	0.326	115
15	500	500	250000	2000	8	30	85	110	2000	64	96.35	183	10.10	0.337	116
16	500	500	250000	2000	8	30	85	115	2000	86	95.25	191	9.82	0.327	117
17	500	500	250000	2000	8	30	85	120	2000	41	97.50	208	10.22	0.341	118
18	500	500	250000	2000	8	30	85	125	2000	70	96.05	215	9.68	0.323	120
19	500	500	250000	2000	8	30	85	130	2000	31	98.00	232	10.22	0.341	122
20	500	500	250000	2000	8	30	85	135	2000	28	98.15	248	9.64	0.321	125

α/α	εύρος x (m)	εύρος y (m)	Εμβαδόν (τ.μ.)	σημεία	σημεία /στρέμμα	Εμβέλεια (m)	απαιτούμενοι αισθητήρες	χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες	επαναλήψεις	σημεία εκτός	Κάλυψη (%)	τρίγωνα	σ ₀ (m)	σ ₀ /r	χρόνος (sec)
21	500	500	250000	2000	8	40	48	50	2000	243	87.40	77	12.46	0.311	96
22	500	500	250000	2000	8	40	48	53	2000	114	93.85	79	11.86	0.296	98
23	500	500	250000	2000	8	40	48	55	2000	134	92.85	80	12.71	0.318	100
24	500	500	250000	2000	8	40	48	57	2000	95	94.80	83	13.13	0.316	99
25	500	500	250000	2000	8	40	48	60	2000	83	95.40	92	11.48	0.287	100
26	500	500	250000	2000	8	40	48	63	2000	73	95.90	100	13.77	0.296	104
27	500	500	250000	2000	8	40	48	65	2000	65	96.30	101	11.44	0.286	104
28	500	500	250000	2000	8	40	48	68	2000	45	97.30	107	11.45	0.286	110
29	500	500	250000	2000	8	40	48	71	2000	60	96.55	118	12.20	0.305	104
30	500	500	250000	2000	8	40	48	75	2000	29	98.10	123	11.36	0.284	107

α/α	εύρος x (m)	εύρος y (m)	Εμβαδόν (τ.μ.)	σημεία	σημεία /στρέμμα	Εμβέλεια (m)	απαιτούμενοι αισθητήρες	χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες	επαναλήψεις	σημεία εκτός	Κάλυψη (%)	τρίγωνα	σ ₀ (m)	σ ₀ /r	χρόνος (sec)
31	500	500	250000	5000	20	20	192	200	2000	501	89.24	356	7.49	0.374	287
32	500	500	250000	5000	20	20	192	210	2000	394	91.38	367	6.95	0.347	288
33	500	500	250000	5000	20	20	192	220	2000	367	91.92	387	7.24	0.362	286
34	500	500	250000	5000	20	20	192	230	2000	245	94.36	399	6.59	0.329	299
35	500	500	250000	5000	20	20	192	240	2000	256	94.14	417	6.92	0.346	310
36	500	500	250000	5000	20	20	192	250	2000	185	95.56	437	6.79	0.340	316
37	500	500	250000	5000	20	20	192	260	2000	192	95.42	467	6.85	0.343	306
38	500	500	250000	5000	20	20	192	270	2000	94	97.38	489	6.72	0.336	310
39	500	500	250000	5000	20	20	192	280	2000	107	97.12	517	6.75	0.337	312
40	500	500	250000	5000	20	20	192	290	2000	112	97.02	522	6.56	0.328	317

α/α	εύρος x (m)	εύρος y (m)	Εμβαδόν (τ.μ.)	σημεία	σημεία /στρέμμα	Εμβέλεια (m)	απαιτούμενοι αισθητήρες	χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες	επαναλήψεις	σημεία εκτός	Κάλυψη (%)	τρίγωνα	σ ₀ (m)	σ ₀ /r	χρόνος (sec)
41	500	500	250000	5000	20	30	85	90	2000	404	91.18	145	9.75	0.325	238
42	500	500	250000	5000	20	30	85	95	2000	362	92.22	152	8.99	0.300	239
43	500	500	250000	5000	20	30	85	100	2000	354	92.18	175	9.28	0.343	243
44	500	500	250000	5000	20	30	85	105	2000	257	94.12	179	9.70	0.323	245
45	500	500	250000	5000	20	30	85	110	2000	211	95.04	191	8.69	0.290	254
46	500	500	250000	5000	20	30	85	115	2000	151	96.24	201	9.69	0.323	248
47	500	500	250000	5000	20	30	85	120	2000	126	96.74	200	8.24	0.275	258
48	500	500	250000	5000	20	30	85	125	2000	96	97.34	207	8.07	0.269	261
49	500	500	250000	5000	20	30	85	130	2000	59	98.08	217	8.22	0.274	269
50	500	500	250000	5000	20	30	85	135	2000	68	98.64	227	7.99	0.271	274

α/α	εύρος x (m)	εύρος y (m)	Εμβαδόν (τ.μ.)	σημεία	σημεία /στρέμμα	Εμβέλεια (m)	απαιτούμενοι αισθητήρες	χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες	επαναλήψεις	σημεία εκτός	Κάλυψη (%)	τρίγωνα	σ ₀ (m)	σ ₀ /r	χρόνος (sec)
51	500	500	250000	5000	20	40	48	50	2000	469	89.88	80	12.46	0.312	229
52	500	500	250000	5000	20	40	48	53	2000	302	93.22	82	11.14	0.278	243
53	500	500	250000	5000	20	40	48	55	2000	246	94.34	86	11.10	0.277	226
54	500	500	250000	5000	20	40	48	57	2000	254	94.18	88	13.30	0.333	229
55	500	500	250000	5000	20	40	48	60	2000	183	95.60	99	12.39	0.310	233
56	500	500	250000	5000	20	40	48	63	2000	164	95.98	103	11.46	0.286	230
57	500	500	250000	5000	20	40	48	65	2000	81	97.67	103	10.16	0.254	232
58	500	500	250000	5000	20	40	48	68	2000	98	97.30	112	11.04	0.276	232
59	500	500	250000	5000	20	40	48	71	2000	34	98.58	114	8.79	0.220	230
60	500	500	250000	5000	20	40	48	75	2000	49	98.28	125	9.24	0.236	233

α/α	εύρος x (m)	εύρος y (m)	Εμβαδόν (τ.μ.)	σημεία	σημεία /στρέμμα	Εμβέλεια (m)	απαιτούμενοι αισθητήρες	χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες	επαναλήψεις	σημεία εκτός	Κάλυψη (%)	τρίγωνα	σ ₀ (m)	σ ₀ /r	χρόνος (sec)
61	500	500	250000	8000	32	20	192	200	2000	744	89.11	350	6.39	0.320	424
62	500	500	250000	8000	32	20	192	210	2000	758	88.94	364	6.97	0.348	428
63	500	500	250000	8000	32	20	192	220	2000	580	91.16	398	6.79	0.340	432
64	500	500	250000	8000	32	20	192	230	2000	478	92.44	404	6.22	0.311	440
65	500	500	250000	8000	32	20	192	240	2000	414	93.24	413	6.36	0.318	439
66	500	500	250000	8000	32	20	192	250	2000	327	94.33	458	6.80	0.340	450
67	500	500	250000	8000	32	20	192	260	2000	299	94.68	468	6.04	0.302	460
68	500	500	250000	8000	32	20	192	270	2000	210	95.79	497	6.02	0.301	457
69	500	500	250000	8000	32	20	192	280	2000	145	96.60	493	5.74	0.287	460
70	500	500	250000	8000	32	20	192	290	2000	131	96.78	521	5.40	0.270	465

α/α	εύρος x (m)	εύρος y (m)	Εμβαδόν (τ.μ.)	σημεία	σημεία /στρέμμα	Εμβέλεια (m)	απαιτούμενοι αισθητήρες	χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες	επαναλήψεις	σημεία εκτός	Κάλυψη (%)	τρίγωνα	σ ₀ (m)	σ ₀ /r	χρόνος (sec)
71	500	500	250000	8000	32	30	85	90	2000	681	89.90	149	9.38	0.313	366
72	500	500	250000	8000	32	30	85	95	2000	556	91.46	156	8.24	0.275	369
73	500	500	250000	8000	32	30	85	100	2000	486	92.34	163	8.60	0.287	377
74	500	500	250000	8000	32	30	85	105	2000	330	94.29	179	8.77	0.292	392
75	500	500	250000	8000	32	30	85	110	2000	313	94.50	182	7.69	0.256	275
76	500	500	250000	8000	32	30	85	115	2000	239	95.43	191	7.62	0.254	380
77	500	500	250000	8000	32	30	85	120	2000	205	95.85	205	7.91	0.264	283
78	500	500	250000	8000	32	30	85	125	2000	135	96.73	214	8.81	0.284	386
79	500	500	250000	8000	32	30	85	130	2000	132	96.76	221	7.83	0.261	393
80	500	500	250000	8000	32	30	85	135	2000	75	97.47	228	7.73	0.250	397

α/α	εύρος x (m)	εύρος y (m)	Εμβαδόν (τ.μ.)	σημεία	σημεία /στρέμμα	Εμβέλεια (m)	απαιτούμενοι αισθητήρες	χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες	επαναλήψεις	σημεία εκτός	Κάλυψη (%)	τρίγωνα	σ ₀ (m)	σ ₀ /r	χρόνος (sec)
81	500	500	250000	8000	32	40	48	50	2000	808	88.31	75	11.35	0.284	348
82	500	500	250000	8000	32	40	48	53	2000	610	90.79	82	9.51	0.238	350
83	500	500	250000	8000	32	40	48	55	2000	400	93.41	83	9.78	0.244	349
84	500	500	250000	8000	32	40	48	57	2000	325	94.35	86	9.79	0.245	349
85	500	500	250000	8000	32	40	48	60	2000	277	94.95	92	10.29	0.257	352
86	500	500	250000	8000	32	40	48	63	2000	171	96.28	95	9.21	0.230	355
87	500	500	250000	8000	32	40	48	65	2000	144	96.61	101	9.12	0.228	357
88	500	500	250000	8000	32	40	48	68	2000	113	97.00	106	10.42	0.260	356
89	500	500	250000	8000	32	40	48	71	2000	82	97.39	111	8.74	0.218	367
90	500	500	250000	8000	32	40	48	75	2000	87	97.33	118	8.73	0.218	381