



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

## **Ανάλυση Αλγορίθμου Βέλτιστης Χωροθέτησης Δικτύων Ασυρμάτων Αισθητήρων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Σ. Τζαννέτος

**Επιβλέπων :** Βασίλειος Βεσκούκης  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2019





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Ανάλυση Αλγορίθμου Βέλτιστης Χωροθέτησης Δικτύων Ασυρμάτων  
Αισθητήρων**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Ιωάννης Σ. Τζαννέτος

**Επιβλέπων :** Βασίλειος Βεσκούκης  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 31<sup>η</sup> Οκτωβρίου

.....

Β.Βεσκούκης

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ν.Παπασπύρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Α.Παγουρτζής

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

.....

Ιωάννης Σ. Τζαννέτος

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

Copyright © Ιωάννης Τζαννέτος 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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



# Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση αλγορίθμου βέλτιστης χωροθέτησης δικτύων ασύρματων αισθητήρων και η βελτίωση του.

Στο **πρώτο κεφάλαιο**, ορίζεται το υπό εξέταση πρόβλημα. Δίνονται βασικές έννοιες και ορισμοί που βοηθούν στην κατανόηση του προβλήματος και παρουσιάζονται ενδεικτικά ορισμένες εφαρμογές από διαφορετικά επιστημονικά πεδία στις οποίες η καλύτερη επίλυση αυτού του προβλήματος, βελτιώνει την ποιότητα των εφαρμογών.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο**, αναλύεται η μελέτη που έχει γίνει μέχρι σήμερα, μέσω των υφισταμένων λύσεων. Έπειτα περιγράφεται η προσέγγιση του Ηλιοδρομίτη Α. μέσω της διδακτορικής του διατριβής και την υλοποίηση του λογισμικού OptEval. Στην συνέχεια αναλύεται η τροποποίηση της Μπίνη Α. του λογισμικού OptEval στα πλαίσια της μεταπτυχιακής της διατριβής. Τέλος παρουσιάζεται περιληπτικά η στρατηγική αντιμετώπισης του προβλήματος και οι βελτιώσεις του λογισμικού OptEval στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

Στο **τρίτο κεφάλαιο**, αναλύονται όλα τα στοιχεία υπολογιστικής γεωμετρίας που χρησιμοποιεί το λογισμικό OptEval κατά την εκτέλεση του, ώστε ο αναγνώστης να μπορεί να κατανοήσει εις βάθος τις διαδικασίες του λογισμικού.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο**, παρουσιάζεται εκτενώς ο τροποποιημένος αλγόριθμος και η υλοποίηση του στην προγραμματιστική γλώσσα python. Επίσης παρουσιάζεται η διαδικασία με την οποία γίνεται η μελέτη της συμπεριφοράς του αλγορίθμου και οδηγίες για την χρήση του high performance computer του συστήματος Aris που χρησιμοποιήθηκε για τις εκτελέσεις των λογισμικών της παρούσας εργασίας.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο**, αναφέρονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάζονται ελλείμματα που κάνουν το θεωρητικό πρόβλημα δύσκολο να εφαρμοστεί επακριβώς στην πράξη και προτείνονται επόμενα βήματα για την συνέχιση της παρούσας ερευνητικής εργασίας.

## Λέξεις Κλειδιά

βέλτιστη κάλυψη, δίκτυο αισθητήρων, χωροθέτηση, OptEval, πολύγωνα Voronoi, τριγωνισμός Delaunay, σύγκλιση, μετρική Hausdorff, υπερυπολογιστής, σύστημα Aris, παραγωγή σεναρίων τυχαίων σημείων.



# Abstract

The objective of this thesis is the study of the behavior of an algorithm for optimal wireless sensor networks deployment in non-controlled environments, as well as the improvement of the algorithm.

In the **first chapter**, the problem under consideration is discussed. Basic concepts and definitions are provided to define the problem. Then, some applications from different thematic areas are illustrated, to which a better resolution of this problem would significantly improve the current situation.

In the **second chapter**, the relevant research within scope is presented, through the existing solutions. Subsequently, the approach of Iliodromitis A. through his doctoral thesis and the implementation of OptEval software is described. Then follows an analysis of the modification of the OptEval software as part of a master's thesis. Finally, an overview of the approach strategy and improvements to the OptEval software as part of this study is presented.

In the **third chapter**, all the computational geometry elements used by the OptEval are analyzed, so that the reader can understand the software procedures in depth.

In the **fourth chapter**, the modified algorithm and its implementation in python are extensively presented. Then, the procedure for studying the behavior of the algorithm and instructions for using the high-performance computing services of the "Aris" system in EDET, which was used to produce the results of this thesis, are presented.

In the **fifth chapter**, the conclusions of this thesis are outlined. Then deficiencies that make the theoretical problem difficult to apply in practice are presented and further steps are suggested for the continuation of the present research work;

## Keywords

optimum coverage, sensor network, siting, OptEval, Voronoi polygons, Delaunay triangulation, convergence, Hausdorff metric, high performance computer, Aris system, random spot scenario generation.



# Ευχαριστίες

Με αυτή την διπλωματική εργασία τερματίζεται το πενταετές ταξίδι μου στο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Αυτό το ταξίδι δεν θα μπορούσε να έρθει εις πέρας χωρίς την στήριξη του πατέρα μου, της μητέρας μου, του αδερφού μου και της πολυαγαπημένης μου αδερφής. Πέραν όμως από την πολύτιμη τους στήριξη, μου έδωσαν όλα τα εφόδια ώστε να γίνω ένας σωστός Άνθρωπος και αυτό είναι κάτι που δεν μαθαίνεται, αλλά μεταδίδεται.

Θα ήθελα να πω ένα τεράστιο ευχαριστώ στον Καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών και επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας Βασίλειο Βεσκούκη, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το παρόν θέμα και τη κρίσιμη συμβολή του. Επίσης τον ευχαριστώ για την καθοδήγηση καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματική μου και την άψογη συνεργασία του. Δεν θα μπορούσα να φανταστώ διαφορετικά την διπλωματική μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διδάκτορα Μηχανικό ΕΜΠ κ. Αθανάσιο Ηλιοδρομίτη, για την βοήθεια που μου προσέφερε για να καταλάβω σε βάθος τον αντικείμενο της διδακτορική του διατριβής και το λογισμικό το οποίο την συνόδευε.

Στην συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τη συνάδελφο Αργυρώ Μπίνη για την άμεση ανταπόκριση και την βοήθεια της να κατανοήσω τις τροποποιήσεις που έκανε στο προαναφερθέν λογισμικό στα πλαίσια της μεταπτυχιακής της εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς όλους τους κοντινούς μου ανθρώπους για την αγάπη και την στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

# Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	1
Λέξεις Κλειδιά.....	1
Abstract.....	3
Keywords.....	3
Ευχαριστίες.....	5
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	14
1.1 Δίκτυα αισθητήρων .....	14
1.1.1 Τοπολογία δικτύου αισθητήρων .....	14
1.1.2 Πρωτόκολλα δικτυακής επικοινωνίας.....	18
1.2 Εφαρμογές δικτύων αισθητήρων .....	19
1.2.1 Μετρητικές εφαρμογές .....	20
1.2.2 Περιβαλλοντικές εφαρμογές.....	21
1.2.3 Μεταφορές.....	23
1.2.4 Ασφάλεια .....	23
1.2.5 Γεωργία .....	24
1.3 Το πρόβλημα της χωροθέτησης δικτύων ασύρματων αισθητήρων .....	24
Κεφάλαιο 2 Υφιστάμενες προσεγγίσεις και οριοθέτηση της εργασίας .....	26
2.1 Γενικές προσεγγίσεις σε προβλήματα βελτιστοποίησης σε WSN .....	26
2.2 Ο αλγόριθμος μελέτης - αρχική έκδοση.....	28
2.3 Ο αλγόριθμος μελέτης - έκδοση 2 .....	29
2.4 Εστίαση της παρούσας εργασίας.....	30
2.4.1 Διαδικτυακό περιβάλλον δημιουργίας προβλημάτων χωροθέτησης .....	30
2.4.2 Οπτικοποίηση προβλημάτων χωροθέτησης και βημάτων εκτέλεσης αλγορίθμου	30
2.4.3 Προσθήκη νέων κριτηρίων τερματισμού.....	30
2.4.4 Επέκταση συμπεριφοράς με δυνατότητα δυναμικής προσαρμογής παραμέτρων	31
2.4.5 Εκτέλεση μεγάλου πλήθους σεναρίων σε περιβάλλον High-Performance Computing, καταγραφή, απεικόνιση και μελέτη συμπεριφοράς .....	31

Κεφάλαιο 3	Στοιχεία Υπολογιστικής Γεωμετρίας .....	32
3.1	Πολύγωνα Voronoi.....	32
3.2	Κεντροειδής διαμέριση Voronoi.....	34
3.3	Ο αλγόριθμος του Lloyd για CVT .....	36
3.4	Τριγωνισμός Delaunay.....	38
3.5	Μετρική Hausdorff.....	39
3.6	Cnn (closest neighbour) & Manhattan Distance .....	42
Κεφάλαιο 4	Ο αλγόριθμος OptEval: συμπεριφορά και επεκτάσεις .....	43
4.1	Χωροθέτηση ασύρματου δικτύου αισθητήρων με χρήση CVT.....	43
4.1.1	Προσδιορισμός βέλτιστων θεωρητικών θέσεων εγκατάστασης .....	43
4.1.2	Προσδιορισμός πραγματικών θέσεων εγκατάστασης.....	45
4.1.3	Υλοποίηση σε Python .....	48
4.2	Λογισμικό δημιουργίας τυχαίων σημείων .....	50
4.2.1	Απαιτήσεις κατανομών τυχαίων σημείων .....	50
4.2.2	Σχεδιασμός σεναρίων εκτέλεσης.....	54
4.3	Λογισμικό παραγωγής τυχαίων σημείων.....	62
4.3.1	Γενική περιγραφή.....	62
4.3.2	Υλοποίηση σε Python .....	64
4.3.3	Δημιουργία "νεκρών ζωνών" .....	65
4.4	Μια νέα υλοποίηση του OptEval .....	67
4.4.1	Αποθήκευση δεδομένων εκτέλεσης .....	67
4.5	Υπολογιστικό περιβάλλον εκτέλεσης High Performance Computing (HPC) ...	77
4.5.1	Το περιβάλλον HPC "Aris" .....	77
4.5.2	Απαιτήσεις και σχεδίαση εκτέλεσης: το περιβάλλον HPC "Aris" .....	78
4.5.3	Οι πόροι που χρησιμοποιήθηκαν στις εκτελέσεις .....	79
4.5.4	Τεχνικά στοιχεία εκτέλεσης .....	79
4.5.5	Αποτελέσματα.....	81
4.6	Ανάλυση συμπεριφοράς αλγορίθμου - evaluation .....	91
4.6.1	Οπτικοποίηση λειτουργίας αλγορίθμου .....	91
4.6.2	Οπτικοποίηση και ανάλυση μετρικών συμπεριφοράς.....	93

Κεφάλαιο 5	Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία.....	125
5.1	Συνεισφορά και πλεονεκτήματα .....	125
5.2	Μελλοντικές Προτάσεις .....	125
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		127



# Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: Τοπολογία αρτηρίας .....	14
Εικόνα 2: Τοπολογία δακτυλίου .....	15
Εικόνα 3: Τοπολογία πολλαπλών κόμβων .....	15
Εικόνα 4: Τοπολογία Δέντρου .....	16
Εικόνα 5: Τοπολογία πλέγματος .....	16
Εικόνα 6: Τοπολογία πλήρους σύνδεσης .....	17
Εικόνα 7: Τοπολογία τριγώνου.....	17
Εικόνα 8: Τοπολογία κυψέλης.....	18
Εικόνα 9: Τοπολογία κυψέλης με επικαλύψεις .....	18
Εικόνα 10: Βασικές έννοιες διαγράμματος Voronoi.....	33
Εικόνα 11: Λάκκοι αναπαραγωγής ψαριού tilapia.....	35
Εικόνα 12: Giant's Causeway (Ιρλανδία).....	36
Εικόνα 13: Διάγραμμα ροής αλγόριθμου Lloyd για κατασκευή CVT .....	37
Εικόνα 14: : Κατασκευή CVT με τον αλγόριθμο του Lloyd, μετά την 1η, 2η, 3η και 15η επανάληψη .....	38
Εικόνα 15: Διάγραμμα Voronoi και ο αντίστοιχος τριγωνισμός Delaunay .....	39
Εικόνα 16: Δίνονται τα σετ σημείων A και B .....	40
Εικόνα 17: Υπολογίζονται οι αποστάσεις $a1b_i$ .....	40
Εικόνα 18: Σημειώνεται η μικρότερη.....	40
Εικόνα 19: Υπολογίζονται οι αποστάσεις $a2b_i$ .....	40
Εικόνα 20: Σημειώνεται η μικρότερη.....	40
Εικόνα 21: Υπολογίζεται η μέγιστη από τις δύο αποστάσεις.....	40
Εικόνα 22: Αυτή είναι η Hausdorff(A,B) .....	41
Εικόνα 23: Κάθε σημείο του A είναι το πολύ σε απόσταση Hausdorff(A,B) από κάποιο σημείο του B .....	41
Εικόνα 24: Υπολογισμός Hausdorff distance για σετ σημείων που ανήκουν σε ευθείες .....	41
Εικόνα 25: Υπολογισμός Hausdorff distance για σετ σημείων που ανήκουν σε κύκλους .....	41

Εικόνα 26: Διαφορά μεταξύ ευκλείδειας απόστασης και απόστασης Manhattan.....	42
Εικόνα 27: Διάγραμμα ροής τροποποιημένου OptEval.....	46
Εικόνα 28: Διάγραμμα ροής OptEval έκδοση 1 .....	47
Εικόνα 29: Διάγραμμα ροής Opteval έκδοση2.....	48
Εικόνα 30: Σενάριο νεκρής ζώνης 10% .....	51
Εικόνα 31: Σενάριο νεκρής ζώνης 20% .....	51
Εικόνα 32: Σενάριο νεκρής ζώνης 30% .....	51
Εικόνα 33: Σενάριο νεκρής ζώνης 40% .....	51
Εικόνα 34: Σενάριο νεκρής ζώνης 50% .....	52
Εικόνα 35: Σενάριο FA_2000_2000_50_2_10.....	52
Εικόνα 36: Σενάριο FA_2000_2000_50_4_10.....	53
Εικόνα 37: FA_2000_2000_50_5_10 .....	53
Εικόνα 38: FA_2000_2000_50_10_10 .....	54
Εικόνα 39: Δυνατότητες λογισμικού παραγωγής νεκρών ζωνών .....	66
Εικόνα 40: : Υπηρεσία παραγωγής νεκρών ζωνών .....	67
Εικόνα 41: Διάγραμμα Voronoi.....	68
Εικόνα 42: Διάγραμμα Delaunay .....	68
Εικόνα 43: Διάγραμμα κάλυψης .....	69
Εικόνα 44: Διάγραμμα αισθητήρων .....	69
Εικόνα 45: Voronoi επανάληψη 1.....	70
Εικόνα 46: Voronoi επανάληψη 2.....	70
Εικόνα 47: Voronoi επανάληψη 3.....	71
Εικόνα 48: Voronoi επανάληψη 4.....	71
Εικόνα 49: Voronoi επανάληψη 5.....	71
Εικόνα 50: Voronoi επανάληψη 6.....	71
Εικόνα 51: Voronoi επανάληψη 7.....	71
Εικόνα 52: Voronoi επανάληψη 8.....	71
Εικόνα 53: Voronoi επανάληψη 9.....	72
Εικόνα 54: Voronoi επανάληψη 10.....	72
Εικόνα 55: Circles επανάληψη 1 .....	72

Εικόνα 56: Circles επανάληψη 2 .....	72
Εικόνα 57: Circles επανάληψη 3 .....	72
Εικόνα 58: Circles επανάληψη 4 .....	72
Εικόνα 59: Circles επανάληψη 5 .....	73
Εικόνα 60: Circles επανάληψη 6 .....	73
Εικόνα 61: Circles επανάληψη 7 .....	73
Εικόνα 62: Circles επανάληψη 8 .....	73
Εικόνα 63: Circles επανάληψη 9 .....	73
Εικόνα 64: Circles επανάληψη 10 .....	73
Εικόνα 65: Delaunay επανάληψη 1 .....	74
Εικόνα 66: Delaunay επανάληψη 2 .....	74
Εικόνα 67: Delaunay επανάληψη 3 .....	74
Εικόνα 68: Delaunay επανάληψη 4 .....	74
Εικόνα 69: Delaunay επανάληψη 5 .....	74
Εικόνα 70: Delaunay επανάληψη 6 .....	74
Εικόνα 71: Delaunay επανάληψη 7 .....	75
Εικόνα 72: Delaunay επανάληψη 8 .....	75
Εικόνα 73: Delaunay επανάληψη 9 .....	75
Εικόνα 74: Delaunay επανάληψη 10 .....	75
Εικόνα 75: Διάγραμμα κάλυψης επανάληψη 1 .....	75
Εικόνα 76: Διάγραμμα κάλυψης επανάληψη 2 .....	75
Εικόνα 77: Διάγραμμα κάλυψης επανάληψη 3 .....	76
Εικόνα 78: Διάγραμμα κάλυψης επανάληψη 4 .....	76
Εικόνα 79: Διάγραμμα κάλυψης επανάληψη 5 .....	76
Εικόνα 80: Διάγραμμα κάλυψης επανάληψη 6 .....	76
Εικόνα 81: Διάγραμμα κάλυψης επανάληψη 7 .....	76
Εικόνα 82: Διάγραμμα κάλυψης επανάληψη 8 .....	76
Εικόνα 83: Διάγραμμα κάλυψης επανάληψη 9 .....	77
Εικόνα 84: Διάγραμμα κάλυψης επανάληψη 10 .....	77
Εικόνα 85: Bash script παραγωγής τυχαίων σημείων .....	80

Εικόνα 86: Bash script εκτέλεσης λογισμικού OptEval.....	81
Εικόνα 87: Random spots results structure .....	82
Εικόνα 88: : OptEval executions results structure .....	83
Εικόνα 89: Δυνατότητες λογισμικού οπτικοποίησης .....	91
Εικόνα 90: Λογισμικό οπτικοποίησης πιθανή συμπεριφορά 1 .....	92
Εικόνα 91: Λογισμικό οπτικοποίησης πιθανή συμπεριφορά 2.....	92
Εικόνα 92: Πλήθος πιθανών σημείων τοποθέτησης αισθητήρων για όλα τα σενάρια τυχαίων σημείων.....	95
Εικόνα 93: Χρόνος δημιουργίας σεναρίων τυχαίων σημείων .....	96
Εικόνα 94: Χρόνος εκτέλεσης OptEval για ακτίνα κάλυψης αισθητήρων 150 Hausdorff πραγματικών.....	98
Εικόνα 95: Χρόνος εκτέλεσης OptEval για ακτίνα κάλυψης αισθητήρων 200 Hausdorff πραγματικών.....	99
Εικόνα 96: Χρόνος εκτέλεσης OptEval για ακτίνα κάλυψης αισθητήρων 250 Hausdorff πραγματικών.....	100
Εικόνα 97: Χρόνος εκτέλεσης OptEval για ακτίνα κάλυψης αισθητήρων 150 Hausdorff θεωρητικών .....	101
Εικόνα 98: Χρόνος εκτέλεσης OptEval για ακτίνα κάλυψης αισθητήρων 200 Hausdorff θεωρητικών.....	102
Εικόνα 99: Χρόνος εκτέλεσης OptEval για ακτίνα κάλυψης αισθητήρων 250 Hausdorff θεωρητικών.....	103
Εικόνα 100: Επαναλήψεις διαδικασιών OptEval για ακτίνα κάλυψης αισθητήρων 150 Hausdorff πραγματικών .....	105
Εικόνα 101: Επαναλήψεις διαδικασιών OptEval για ακτίνα κάλυψης αισθητήρων 200 Hausdorff πραγματικών .....	106
Εικόνα 102: Επαναλήψεις διαδικασιών OptEval για ακτίνα κάλυψης αισθητήρων 250 Hausdorff πραγματικών .....	107
Εικόνα 103: Επαναλήψεις διαδικασιών OptEval για ακτίνα κάλυψης αισθητήρων 150 Hausdorff θεωρητικών .....	108
Εικόνα 104: Επαναλήψεις διαδικασιών OptEval για ακτίνα κάλυψης αισθητήρων 200 Hausdorff θεωρητικών .....	109
Εικόνα 105: Επαναλήψεις διαδικασιών OptEval για ακτίνα κάλυψης αισθητήρων 250 Hausdorff θεωρητικών .....	110
Εικόνα 106: Ποσοστό αύξησης αισθητήρων για επίτευξη ζητούμενης κάλυψης( νεκρή ζώνη 0%, Hausdorff πραγματικών) .....	112

Εικόνα 107: Ποσοστό αύξησης αισθητήρων για επίτευξη ζητούμενης κάλυψης( νεκρή ζώνη 10%, Hausdorff πραγματικών) .....	113
Εικόνα 108: Ποσοστό αύξησης αισθητήρων για επίτευξη ζητούμενης κάλυψης( νεκρή ζώνη 20%, Hausdorff πραγματικών) .....	114
Εικόνα 109: Ποσοστό αύξησης αισθητήρων για επίτευξη ζητούμενης κάλυψης( νεκρή ζώνη 30%, Hausdorff πραγματικών) .....	115
Εικόνα 110: Ποσοστό αύξησης αισθητήρων για επίτευξη ζητούμενης κάλυψης( νεκρή ζώνη 40%, Hausdorff πραγματικών) .....	116
Εικόνα 111: Ποσοστό αύξησης αισθητήρων για επίτευξη ζητούμενης κάλυψης( νεκρή ζώνη 50%, Hausdorff πραγματικών) .....	117
Εικόνα 112: Ποσοστό αύξησης αισθητήρων για επίτευξη ζητούμενης κάλυψης( νεκρή ζώνη 0%, Hausdorff θεωρητικών) .....	118
Εικόνα 113: Ποσοστό αύξησης αισθητήρων για επίτευξη ζητούμενης κάλυψης( νεκρή ζώνη 10%, Hausdorff πραγματικών) .....	119
Εικόνα 114: Ποσοστό αύξησης αισθητήρων για επίτευξη ζητούμενης κάλυψης( νεκρή ζώνη 20%, Hausdorff πραγματικών) .....	120
Εικόνα 115: Ποσοστό αύξησης αισθητήρων για επίτευξη ζητούμενης κάλυψης( νεκρή ζώνη 30%, Hausdorff πραγματικών) .....	121
Εικόνα 116: Ποσοστό αύξησης αισθητήρων για επίτευξη ζητούμενης κάλυψης( νεκρή ζώνη 40%, Hausdorff πραγματικών) .....	122
Εικόνα 117: Ποσοστό αύξησης αισθητήρων για επίτευξη ζητούμενης κάλυψης( νεκρή ζώνη 50%, Hausdorff πραγματικών) .....	123

# Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

## 1.1 Δίκτυα αισθητήρων

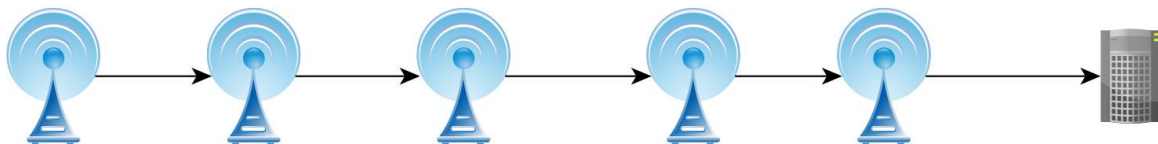
Με τον όρο αισθητήρας νοείται κάθε συσκευή που μετρά μια φυσική ποσότητα και κατόπιν την μετατρέπει σε ένα αναγνώσιμο ( από ένα παρατηρητή ή από ένα όργανο) σήμα (signal). Με απλούστερα λόγια, ένας αισθητήρας είναι μια συσκευή που λαμβάνει ένα σήμα και ανταποκρίνεται σε αυτό [ Δούκας, 2014 ].

Ως ασύρματο δίκτυο αισθητήρων ορίζεται ένα σύνολο αισθητήρων, οι οποίοι έχουν την δυνατότητα να επικοινωνούν ασύρματα μεταξύ τους, αλλά και με κάποια κεντρική υπολογιστική μονάδα που επεξεργάζεται τις πληροφορίες που συλλέγει το δίκτυο. Οι τοπολογίες ασύρματων δικτύων αισθητήρων διακρίνονται σε φυσικές και λογικές. Η φυσική τοπολογία αφορά την τοποθέτηση (κατανομή, διάταξη) των αισθητήρων στο χώρο. Ως λογική τοπολογία ενός δικτύου, 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. Για την ίδια φυσική τοπολογία, είναι εφικτές πολλές λογικές τοπολογίες [ Κολεγά, 2014]. Στη συνέχεια, αναφερόμαστε σε λογικές τοπολογίες.

### 1.1.1 Τοπολογία δικτύου αισθητήρων

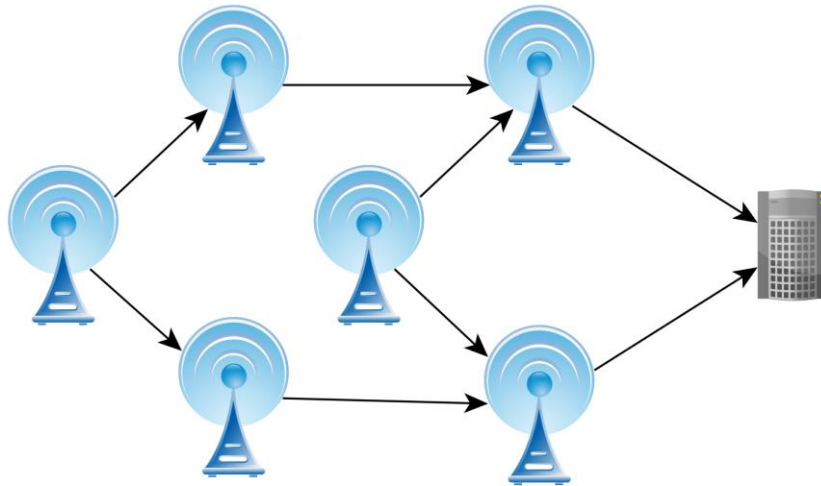
Η επιλογή της τοπολογίας του δικτύου είναι καθοριστικής σημασίας για την επιτυχία του. Κάποιες από τις βασικές τοπολογίες εγκατάστασης δικτύου αισθητήρων περιγράφονται στην συνέχεια.

**Τοπολογία αρτηρίας – Bus:** Είναι η απλούστερη τοπολογία ενός δικτύου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση οι αισθητήριοι κόμβοι συνδέονται σειριακά και κάθε ένας μεταδίδει στον γειτονικό του κόμβο τα δεδομένα του, ο τελευταίος κόμβος είναι η μονάδα επεξεργασίας των δεδομένων( δρομολογητής ).



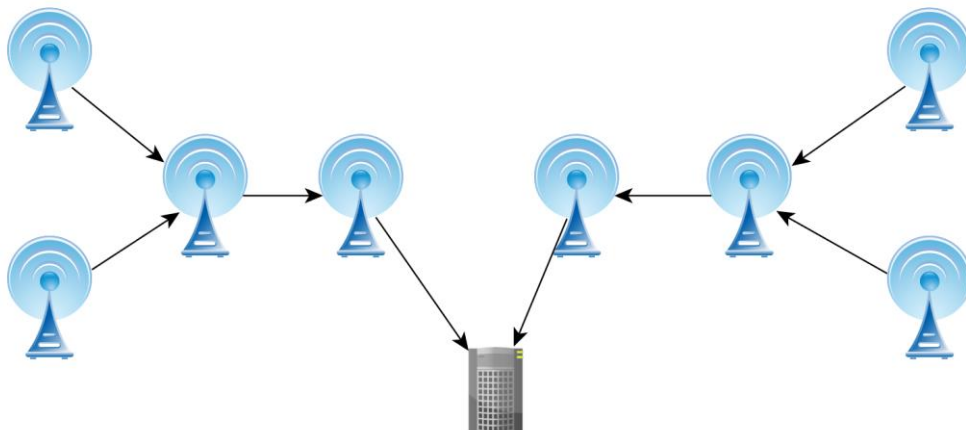
Εικόνα 1: Τοπολογία αρτηρίας

**Τοπολογία δακτυλίου – Ring :** Στα δίκτυα με τοπολογία δακτυλίου κάθε κόμβος έχει δύο γειτονικούς, με τους οποίους μπορεί να επικοινωνεί, με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται δύο μονοπάτια από την μια άκρη του δικτύου μέχρι την άλλη που μεταφέρουν την ίδια πληροφορία.



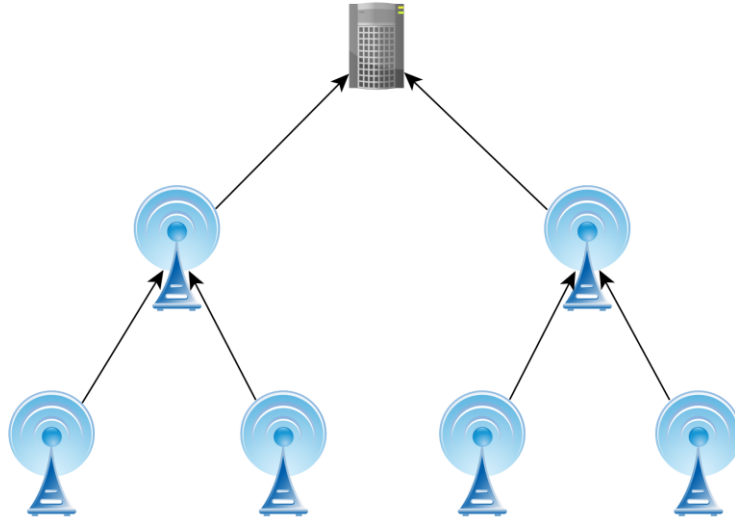
Εικόνα 2: Τοπολογία δακτυλίου

**Τοπολογία πολλαπλών κόμβων – multihop** : Η συγκεκριμένη τοπολογία παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με τις από πάνω. Όπως φαίνεται από το παρακάτω σχήμα, οι αισθητήριои κόμβοι δεν ενώνονται μεταξύ τους σε δακτύλιο και ο δρομολογητής δεν βρίσκεται στο τέλος της αλληλουχίας, αλλά στο μέσον αυτής.



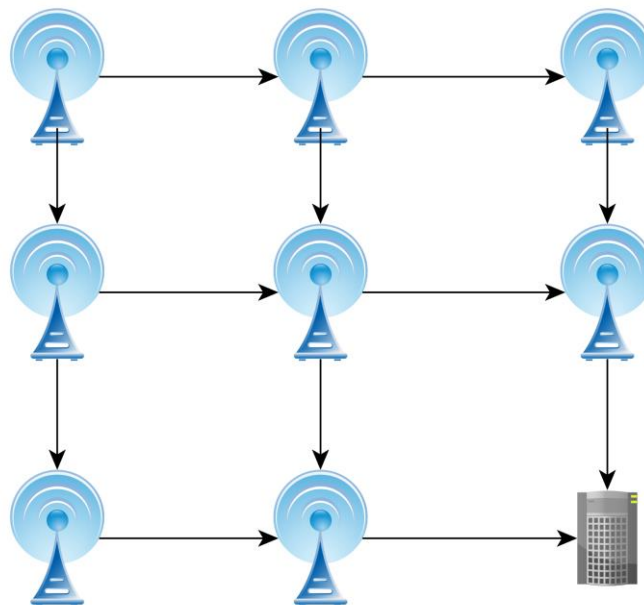
Εικόνα 3: Τοπολογία πολλαπλών κόμβων

**Τοπολογία Δέντρου – Tree** : Στη συγκεκριμένη τοπολογία, η διάταξη των αισθητήρων είναι δενδροειδής 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.



Εικόνα 4: Τοπολογία Δέντρου

**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.

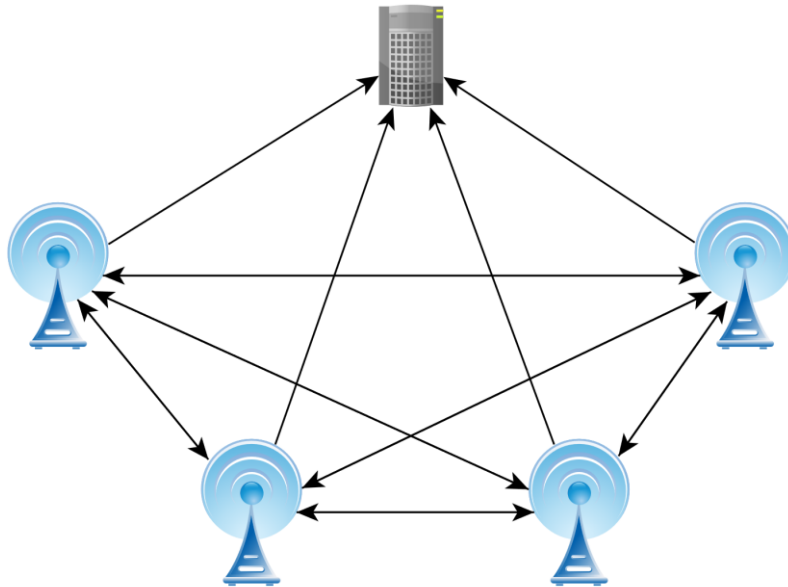


Εικόνα 5: Τοπολογία πλέγματος

**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

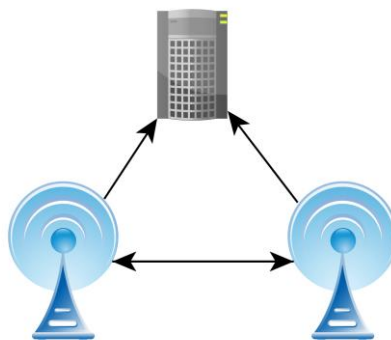


δίκτυο ευρείας κλίμακας οργανώνεται σε κυψέλες. Η κυψέλη διαθέτει έναν δρομολογητή, ενώ η προσθήκη εφεδρικού επηρεάζει τόσο την τοπολογία, όσο και το κόστος, ενώ η τοποθέτησή του ενδέχεται να μην του επιτρέπει να συνδέεται με όλους τους κόμβου.



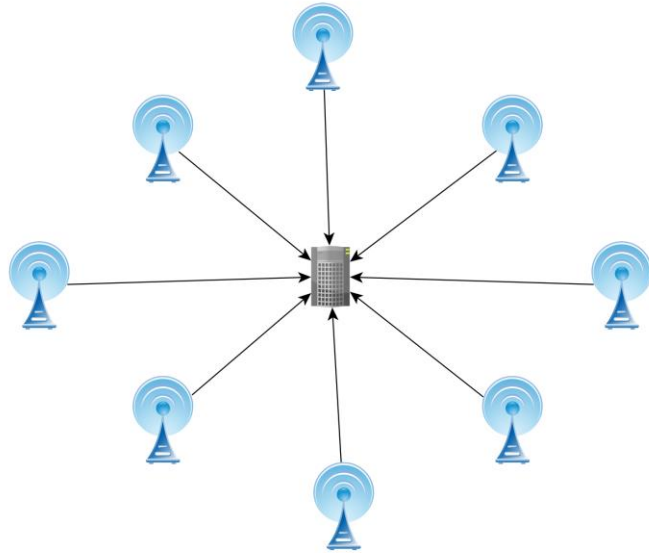
*Εικόνα 6: Τοπολογία πλήρους σύνδεσης*

**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. Ουσιαστικά η συγκεκριμένη δομή αποτελείται από 6 μοναδιαίες τοπολογίες τριγώνου με ίσες πλευρές.



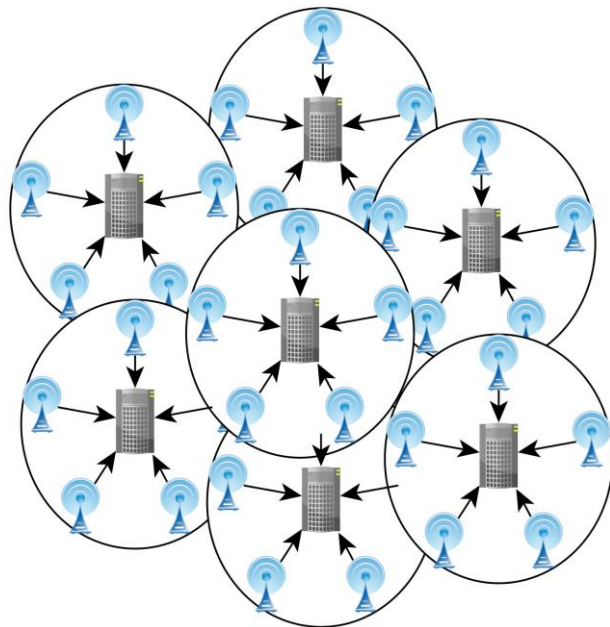
*Εικόνα 7: Τοπολογία τριγώνου*

Η μοναδιαία τοπολογία τριγώνου, αποτελεί υποκατηγορία αυτής του πλέγματος πλήρους σύνδεσης. 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.



Εικόνα 8: Τοπολογία κυψέλης

**Τοπολογία αστέρα – κυψέλης με επικαλύψεις :** Η συγκεκριμένη τοπολογία είναι ουσιαστικά μια παραλλαγή της παραπάνω στην οποία, κάθε αισθητήρας μπορεί να βρίσκεται στην εμβέλεια περισσότερων του ενός δρομολογητών.



Εικόνα 9: Τοπολογία κυψέλης με επικαλύψεις

### 1.1.2 Πρωτόκολλα δικτυακής επικοινωνίας

Η επιλογή του πρωτοκόλλου επικοινωνίας είναι πολύ σημαντική για την μείωση της απαιτούμενης ενέργειας του δικτύου καθώς και του χρόνου μετάδοσης των δεδομένων στον δρομολογητή. Το πρόβλημα αυτό έχει μικρή σημασία σε δίκτυα που βρίσκονται σε

ελεγχόμενα περιβάλλοντα (πχ πάνω στους στύλους φωτισμού) όπου υπάρχει σταθερή παροχή ενέργειας. Ωστόσο, σε μη-ελεγχόμενα περιβάλλοντα αποτελεί κρίσιμο παράγοντα, καθώς η αντικατάσταση μπαταριών μπορεί να είναι μη-εφικτή για λόγους κόστους, ακόμη και κόστους επίσκεψης όλων των αισθητήρων. Ενδεικτικά κάποια πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στην πράξη είναι τα εξής :

- **Bluetooth** : Βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.1 και μπορεί να παρέχει χαμηλούς ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων έως 1 Mbit /sec και δύναται να υποστηρίξει τοπολογίες διασύνδεσης τύπου αστέρα. Με το Bluetooth επιτυγχάνεται σχετικά μικρή κατανάλωση ενέργειας και ασφαλής δικτύωση.
- **Bluetooth Low Energy** : Πρόκειται για μια ενδιαφέρουσα παραλλαγή του Bluetooth, σχεδιασμένη για εφαρμογές που απαιτούν ιδιαίτερα χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο επιτυγχάνει δραστικό περιορισμό της ενέργειας λόγω της μείωσης του χρόνου σύνδεσης σε μερικά ms σε σχέση με το Bluetooth που είναι της τάξης των 100 ms.
- **ZigBee** : Βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.4 και στοχεύει στην μεταφορά χαμηλού ρυθμού δεδομένων, έως 250 kbps με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Ο σχεδιασμός του πρωτοκόλλου επιτρέπει την σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας λόγω της παραμονής του αισθητήρα σε κατάσταση αδράνειας σε μεγάλα χρονικά διαστήματα και της πολύς γρήγορης εναλλαγής του από την κατάσταση αναμονής στην κατάσταση λειτουργίας όταν απαιτείται μεταφορά δεδομένων ( της τάξεως των 30 ms).
- **LoRa** : Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο δημιουργήθηκε το 2015 και αποτελεί ιδανική τεχνολογία για κατασκευή IoT δικτύων. Τα στοιχεία του που το καθιστούν ιδανικό για τέτοιες εφαρμογές είναι η μεγάλη εμβέλεια καθώς και η μικρή κατανάλωση ισχύος. Πιο συγκεκριμένα δύο κόμβοι LoRa έχουν την δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας μέχρι και 15 km, ενώ βρίσκεται σε ημιαστικό περιβάλλον. Επίσης το πρωτόκολλο είναι με τέτοιο τρόπο σχεδιασμένο για λειτουργίες χαμηλής κατανάλωσης, που επιτρέπουν τη χρήση μπαταρίας με διάρκεια ζωής 10 έτη.

## 1.2 Εφαρμογές δικτύων αισθητήρων

Τα δίκτυα αισθητήρων 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 μεγάλες κλίμακες.

Οι εφαρμογές μπορούν να ενταχθούν σε δύο κύριες κατηγορίες:

- i. παρακολούθηση (monitoring) Οι οποίες περιλαμβάνουν την εποπτεία του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, αποθεμάτων αποθήκης, σεισμικής δραστηριότητας, δομικών κατασκευών, υγείας κ.ά. και
- ii. εντοπισμός/ιχνηλάτιση (tracking) οι οποίες περιλαμβάνουν εντοπισμό αντικειμένων, ανθρώπων, ζώων ή οχημάτων [Yick, Mukherjee, & Ghosal, 2008].

Με στόχο την ανάδειξη της σημασίας του προβλήματος της βέλτιστης χωροθέτησης, ακολούθως γίνεται μια σύντομη επισκόπηση κάποιων χαρακτηριστικών θεματικών περιοχών τέτοιων εφαρμογών.

### 1.2.1 Μετρητικές εφαρμογές

Ένας σημαντικός κλάδος της γεωδαισίας είναι οι εφαρμογές παρακολούθησης μικρομετακινήσεων, είτε τεχνικών έργων, είτε τμημάτων της φυσικής γήινης επιφάνειας (σεισμική δραστηριότητα, καταπτώσεις πρηνών κ.ά.). 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.ά. 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].

Για παράδειγμα στην παρακολούθηση παραμορφώσεων μιας γέφυρας, μιας σήραγγας ή ενός φυσικού πρηνούς, 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].

Καθώς 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.ά.) 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.ά.), βροχόμετρα, θερμόμετρα κ.ά. Παλαιότερα τα δεδομένα διαφορετικών δεκτών - αισθητήρων συλλέγονταν και αξιολογούνταν ξεχωριστά, δίνοντας διαφορετικά συμπεράσματα. [Leica Geosystems, 2010], [<http://www.leica-geosystems.com>, 2015].

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 αυτοί 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. Το εντατικό πεδίο που προκύπτει από τις μετρήσεις συγκρίνεται με τα αποτελέσματα 3-D ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία.

Πολλές είναι οι περιπτώσεις κατά τις οποίες απαιτείται να καταγραφεί με ακρίβεια η 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.ά. Όπως και στην περίπτωση των παραμορφώσεων, είναι πιθανό η μορφή της κατασκευής να επηρεάζεται από φυσικούς παράγοντες (θερμοκρασία, υγρασία κ.ά.) ή ακόμα και από χημικούς (ατμοσφαιρική ρύπανση, εκπομπές αερίων κ.ά.). 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, jwdx2014], [D' Amato, Gamba, & Goldoni, 2012], [Rizzi, Voltolini et al., 2007].

## 1.2.2 Περιβαλλοντικές εφαρμογές

### 1.2.2.1 Ανίχνευση δασικών πυρκαγιών

Εξαιρετικά σημαντική είναι η συνεισφορά των δικτύων αισθητήρων στην έγκαιρη ανίχνευση πυρκαγιών [Kolega, Vescoukis, & Douligeris, 2010], [Yu, Wang, & Meng, 2005] [Alkhatib, 2013], [Bolourchi & Uysal, 2013]. 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 εντοπιστεί 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.

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. Το σημαντικότερο μειονέκτημα του συστήματος είναι οι ενεργειακές απαιτήσεις για τη λειτουργία του "ευφυούς" δικτύου αισθητήρων, οι οποίες καθιστούν ανέφικτη την εφαρμογή του σε μεγάλη κλίμακα, [Μαρκάτος, Βεσκούκης, & Κυρανούδης, 2008].

#### 1.2.2.2 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 στο πρόβλημα της μέτρησης ρύπων έχουν δώσει τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. 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 (EPFL - 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.

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 αισθητήρων, το οποίο παρακολουθεί μια σειρά περιβαλλοντικών παραμέτρων σε ολόκληρη την πόλη. 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 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].

### 1.2.3 Μεταφορές

Η αξιοποίηση των δικτύων αισθητήρων μπορεί να συμβάλει στον τομέα των μεταφορών και συγκοινωνιών [Wen, Pan, & Le. J, 2007], [Karpis, 2013], [Nellore & Hancke, 2016]. Τα δίκτυα αυτά 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. Με κατάλληλες διατάξεις μπορούν να αξιοποιηθούν δεδομένα θέσης (GPS) από οχήματα, σε συνδυασμό με άλλες μετρήσεις από δίκτυα αισθητήρων στο πεδίο, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα υλοποίησης πολλών χρήσιμων εφαρμογών για το χρήστη, όπως η αυτόματη ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ οχημάτων για διάφορες συνθήκες, όπως οι συνθήκες οδήγησης και περιβάλλοντος.

Συναφής είναι η εποπτεία στόλου οχημάτων, η οποία επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση ενός δικτύου αισθητήρων στα οχήματα. Αυτοί περιλαμβάνουν δέκτες του προσδιορισμού θέσης και κατάστασης του οχήματος, ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση τόσο της θέσης τους, όσο και παραμέτρων που σχετίζονται με το ίδιο το όχημα και το περιβάλλον του. Επίσης, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί ποικίλα λογισμικά παρακολούθησης και καθοδήγησης μηχανημάτων από απόσταση με διαφορετικές δυνατότητες για διάφορες εφαρμογές. Μέσω της εγκατάστασης ενός δικτύου αισθητήρων στο στόλο οχημάτων συλλέγονται δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, για ένα πλήθος παραμέτρων, όπως τη θέση, την κατανάλωση καυσίμου, το χρόνο λειτουργίας και την κατάσταση της μηχανής, αλλά και εικόνα/ήχο από το χώρο κίνησης του οχήματος.

### 1.2.4 Ασφάλεια

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

- Εποπτεία 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 μπορούν να λειτουργήσουν ως συστήματα ανίχνευσης τέτοιων επιθέσεων, συμβάλλοντας έτσι στην ασφάλεια των πολιτών.
- Παρακολούθηση τακτικών δυνάμεων, εξοπλισμού και οπλισμού. Κάθε στρατιώτης, όχημα, εξοπλισμός και στοιχείο οπλισμού μπορεί να εφοδιάζεται με ένα κόμβο αισθητήρων ώστε να υπάρχει εποπτεία ανά πάσα στιγμή σχετικά με τη διαθεσιμότητά τους.

- Παρακολούθηση πεδίου. Κάθε κρίσιμο πεδίο, καθώς και οι διαδρομές πρόσβασης σε κρίσιμα σημεία μπορούν να παρακολουθούνται μέσω κόμβων αισθητήρων, ώστε να είναι άμεσα αντιληπτές οι κινήσεις.

### 1.2.5 Γεωργία

Η εξέλιξη της τεχνολογίας και η αξιοποίηση δεδομένων από δίκτυα αισθητήρων έχει θετική επίδραση και στον τομέα της γεωργίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επικρατεί μια νέα τάση γνωστή ως "γεωργία ακριβείας" (precision agriculture). 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. [Bencini, Di Palma, Collodi, Manes, & Manes, 2010], [Zhu, Song, & Dong, 2011], [Ojha, Misra, & Raghuwanshi, 2015].

Μέσω δικτύων αισθητήρων, κατανεμημένων κατάλληλα, επιτυγχάνεται ακριβής άρδευση και τοποθέτηση λιπάσματος με χρήση κόμβων που αισθάνονται την υγρασία και τη σύνθεση του εδάφους. 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.ά.) και ειδοποιεί σε περίπτωση υπέρβασης προκαθορισμένων κατωφλίων.

## 1.3 Το πρόβλημα της χωροθέτησης δικτύων ασύρματων αισθητήρων

Όπως είναι φανερό, τα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων αποκτούν ολοένα και περισσότερες εφαρμογές και διεισδύουν σε κάθε πτυχή της ανθρώπινης δραστηριότητας. Η μετάβαση στο Internet of Things (IoT), είναι σήμερα ιδιαίτερα έντονη. Αισθητήρες υπάρχουν πλέον κυριολεκτικά παντού, πολλοί εκ των οποίων σε προσωπικά αντικείμενα καθημερινής χρήσης. Εστιάζουμε σε σταθερά εγκατεστημένα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων, δηλαδή σε δίκτυα των οποίων οι αισθητήρες δεν μετακινούνται, όπως για παράδειγμα οι αισθητήρες που υπάρχουν σε ένα αυτοκίνητο ή σε ένα smartphone και ιδιαίτερα στη βέλτιστη φυσική χωροθέτηση τέτοιων δικτύων, στην οποία αναφερόμαστε στη συνέχεια.

Η βέλτιστη χωροθέτηση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων (WSN - Wireless Sensors Network) είναι πολυδιάστατο πρόβλημα με δύο κύριες συνιστώσες: τη βέλτιστη δικτυακή κάλυψη και τη βέλτιστη χωρική κάλυψη με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του κόστους (πλήθος αισθητήρων κ.ά. παράμετροι). Με τον όρο "βέλτιστη δικτυακή κάλυψη" εννοούμε τη διασφάλιση της δυνατότητας κάθε αισθητήρα να μπορεί να μεταδώσει τα δεδομένα του στο σύστημα εποπτείας, μέσω τουλάχιστον ενός κόμβου "gateway". Για gateways των οποίων η περιοχή λήψης σήματος γεωμετρικά είναι κύκλος, η βέλτιστη τοπολογία για δικτυακή κάλυψη 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 τρίγωνα, εξασφαλίζει την πλήρη χωρική κάλυψη με τον ελάχιστο αριθμό αισθητήρων, εφόσον είναι τεχνικά εφικτή. [ΗΛΙΟΔΡΟΜΙΤΗΣ, Α, 2017]

Η τοποθέτηση των κόμβων ενός WSN, ενδεχομένως και να είναι απλή ως διαδικασία, όταν πρόκειται για περιορισμένο πεδίο παρατήρησης. Για εφαρμογές μικρής κλίμακας, όπως



η γεωργία ακριβείας, όπου ο αριθμός των αισθητήρων είναι σχετικά μικρός και οι θέσεις τοποθέτησης ελεγχόμενες, 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 στην κλίμακα των προβλημάτων στα οποία εστιάζουμε μπορεί να ξεπεράσει τις μερικές χιλιάδες. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου, ακόμα και σε εφαρμογές περιορισμένου χωρικού πεδίου, μπορεί να απαιτείται μεγάλος αριθμός αισθητήρων για την πλήρη παρατήρηση ενός φαινομένου. Επακόλουθο είναι να αυξάνεται κατακόρυφα και το κόστος εγκατάστασης.

Το πρόβλημα γίνεται ενδιαφέρον όταν οι δυνατές θέσεις εγκατάστασης αισθητήρων δεν μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιοδήποτε σημείο του πεδίου, αλλά μόνο σε συγκεκριμένες και ελεγχόμενες θέσεις. Η τοποθέτησή τους υπό διάταξη ιδανικής γεωμετρίας (ισόπλευρα τρίγωνα), είναι πρακτικά αδύνατη. Χαρακτηριστικό, αλλά όχι μοναδικό παράδειγμα αποτελεί η εφαρμογή για ανίχνευση καπνού / πυρκαγιάς σε ένα δάσος. Οι εφικτές θέσεις εγκατάστασης των δεκτών, βρίσκονται αποκλειστικά πάνω σε κάποια από τα δέντρα, τα οποία, όμως, δεν βρίσκονται σε καμία κανονική διάταξη.

Έτσι, λοιπόν, αναζητούνται οι καλύτερες δυνατές θέσεις εγκατάστασης, από ένα πλήθος υποψηφίων θέσεων, οι οποίες έχουν αθροιστικά τις εξής ιδιότητες [[Iliodromitis, Pantazis, & Vescoukis, 2017](#)]:

- Οι αισθητήρες που τοποθετούνται σε αυτές καλύπτουν όλη την περιοχή
- Ο αριθμός τους είναι ο ελάχιστος δυνατός για τη συγκεκριμένη κάλυψη.
- Η πιθανότητα μη ανίχνευσης του φαινομένου ή μη-επικοινωνίας των μετρητικών δεδομένων είναι ελάχιστη.

## Κεφάλαιο 2 Υφιστάμενες προσεγγίσεις και οριοθέτηση της εργασίας

Η χωροθέτηση ασύρματων δικτύων αισθητήρων και αισθητήρων καθώς και η μελέτη της βελτιστοποίησης παραμέτρων τέτοιων δικτύων, είναι αντικείμενα επιστημονικής μελέτης με αρκετή δραστηριότητα τα τελευταία χρόνια. Η μελέτη της βέλτιστης χωροθέτησης, εστιάζει σε δύο παραμέτρους: στην γεωγραφική κάλυψη 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 είναι πλήρης η γεωγραφική κάλυψη της περιοχής, το δίκτυο δεν επιτυγχάνει το σκοπό του.

### 2.1 Γενικές προσεγγίσεις σε προβλήματα βελτιστοποίησης σε WSN

Αρχικά, αξίζει να σημειωθεί ότι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης δικτυακής επικοινωνίας σε δίκτυα ασύρματων αισθητήρων προτείνονται σε πολλές εργασίες και σε πολλές παραλλαγές ανάλογα με τις φυσικές συνθήκες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα βελτιστοποίησης επικοινωνίας για ευρείας κλίμακας ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελεί η εργασία "Optimal deployment of large wireless sensor networks". [Toumpis & Tassioulas, 2006]

Επιπρόσθετα, η κεντροειδής διαμέριση Voronoi (CVT - Centroidal Voronoi Tessellation) προτείνεται ως μέθοδος βελτιστοποίησης της δικτυακής επικοινωνίας από τους [Zhou, Jin, & Wu, 2013]. Στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής "Ανάπτυξη μεθοδολογιών χωροθέτησης & αξιολόγησης ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων με αλγορίθμους υπολογιστικής γεωμετρίας" [ΗΛΙΟΔΡΟΜΙΤΗΣ. Α, 2017] η διαμέριση CVT εφαρμόζεται αρχικά με την υπόθεση ότι τα σημεία εγκατάστασης βρίσκονται τοποθετημένα σε θέσεις που επιτυγχάνουν ιδανική γεωμετρία και όχι σε τυχαίες θέσεις. Ακολούθως, χρησιμοποιείται ως η κεντρική μεθοδολογία επίλυσης του προβλήματος της χωροθέτησης.

Εν συνεχεία, σε ότι αφορά τη γεωγραφική κάλυψη, υπάρχει επίσης πλήθος αλγορίθμων σε πολλές παραλλαγές. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι αλγόριθμοι που έχουν αναπτυχθεί είναι ευρετικοί (heuristics), γεγονός αναμενόμενο από τη μη κανονικότητα της διάταξης των πιθανών θέσεων. Οι αλγόριθμοι αυτοί δίνουν μια λύση από ένα σύνολο πιθανών λύσεων, σε μικρό χρονικό διάστημα, χωρίς να αποδεικνύεται ότι αυτή είναι η καλύτερη δυνατή. Παραμένει λοιπόν το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης. Επιπλέον, στις περισσότερες μελέτες, δεν υπάρχει η απαίτηση ικανοποίησης συγκεκριμένων συνθηκών ("δεσμεύσεων") στις θέσεις εγκατάστασης των αισθητήρων, αλλά η τοποθέτηση γίνεται σε τυχαίες θέσεις, πράγμα θεωρητικά "βολικό", στην πράξη, όμως, όχι πάντα εφαρμόσιμο.

Στην ελληνική βιβλιογραφία, έχει προταθεί κατά το παρελθόν ένας ευρετικός αλγόριθμος σχεδιασμού και υλοποίησης ενός δικτύου αισθητήρων ευρείας κλίμακας και υψηλής χωρικής πυκνότητας, σε σχέση με το 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. Αρχικά η περιοχή υποδιαιρείται σε μικρότερες με τη χρήση του αλγορίθμου Quad-trees και ομαδοποιείται με τον αλγόριθμο k-means. Ορίζεται η πλευρά  $a$  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. 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, παρόλα 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 δικτυακής επικοινωνίας για μεγάλες περιοχές προτείνεται από τους [Wang, Hu, & Tseng, 2005]. Στη μεθοδολογία αυτή, συγκρίνεται η ακτίνα ανίχνευσης  $r_s$  (sensing range) και η ακτίνα επικοινωνίας  $r_c$  (connectivity range) του αισθητήρα και διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

- Αν  $r_c \leq \sqrt{3} * r_s$ , 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  $\frac{r_c}{2}$ .
- $r_c > \sqrt{3} * r_s$ , προτείνεται η τοποθέτηση να γίνεται σε κανονικό εξαγωνικό κανάβο, λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρει η συγκεκριμένη διάταξη.

Για λόγους απλότητας, που δεν ισχύουν πάντα, και στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι τόσο η επικοινωνιακή, όσο και η ανιχνευτική εμβέλεια των αισθητήρων είναι κύκλος, πράγμα που δεν ισχύει στις πιο ενδιαφέρουσες περιπτώσεις. Αυτό, διότι παράγοντες του εκάστοτε περιβάλλοντος, όπως το φύλλωμα των δέντρων ή η ανομοιογένεια των υλικών του εδάφους, μεταβάλλουν τη γεωμετρία της κάλυψης. Σε όλες τις περιπτώσεις η τοποθέτηση βασίζεται στην επίτευξη ιδανικής γεωμετρίας, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι ιδιαιτερότητες της περιοχής μελέτης. Όπως έχει αναφερθεί η ιδανική γεωμετρία επιτυγχάνεται με τη πλήρη κάλυψη, ωστόσο δεν είναι συνήθως εφικτό να υλοποιηθεί.

Παρόμοια μεθοδολογία τοποθέτησης που βασίζεται στις ακτίνες ανίχνευσης και επικοινωνίας των αισθητήρων, δημιουργώντας εξάγωνα από ισοσκελή τρίγωνα, προτείνεται στην εργασία "Study on Optimal Regular Deployment Patterns of Wireless Sensor Network" [Zhang & Zhou, 2012].

Μια προσέγγιση χωροθέτησης με χρήση πολυγώνων Voronoi (VD) γίνεται από τους [Vieira, Vieira, et al, 2003]. Στην περίπτωση αυτή, λαμβάνονται ως δεδομένα εισόδου η περιοχή μελέτης και οι υποψήφιοι 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 δοσμένο κατώφλι (όριο). Για μεγάλο αριθμό αισθητήρων ο αλγόριθμος γίνεται εξαιρετικά αργός. [Vieira, Vieira, & et al., 2003]

Ένας άλλος αλγόριθμος, ο τριγωνισμός Delaunay [Delaunay, Boris, 1934] χρησιμοποιείται επίσης ως βάση σε αλγορίθμους χωροθέτησης ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Οι ιδιότητες του τριγωνισμού Delaunay είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στις περιπτώσεις κάλυψης τέτοιων δικτύων. Τα πλεονεκτήματα του σε σχέση με τον τετραγωνικό κάρναβο 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.

Επιπλέον, χαρακτηριστική θεωρείται και η εργασία: "Energy Efficient Coverage with Variable Sensing Radii in Wireless Sensor Networks" [Wang & Medidi, 2007]. Με την προτεινόμενη μεθοδολογία εστιάζουν στο πρόβλημα της ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας κατά την επικοινωνία των αισθητήρων με ταυτόχρονη πλήρη κάλυψη της περιοχής. Το πρόβλημα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στις περιπτώσεις που εφαρμόζονται "ευφυή" πρωτόκολλα επικοινωνίας, όπως multi-hop. Και σε αυτή την περίπτωση, όμως, λαμβάνεται ως απαίτηση μια ιδανική γεωμετρία χωροθέτησης.

Αργότερα, 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 αισθητήρων 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.ά.).

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. Η περιοχή χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα με τετραγωνικό κάρναβο. 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. 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 για μεγάλες κλίμακες. Στην εφαρμογή οι θέσεις τοποθέτησης αφορούσαν ιδανική γεωμετρία, αλλά πιθανόν η χρήση αισθητήρων να επιτρέπει την πλοήγηση και εγκατάστασή τους προς προεπιλεγμένες θέσεις.

## 2.2 Ο αλγόριθμος μελέτης - αρχική έκδοση

Στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής "Ανάπτυξη μεθοδολογιών χωροθέτησης & αξιολόγησης ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων με αλγορίθμους υπολογιστικής γεωμετρίας"

[αναφορά στο διδακτορικό Ηλιοδρομήτη] αναπτύχθηκε και υλοποιήθηκε μια νέα μεθοδολογία καθώς και το αντίστοιχο λογισμικό χωροθέτησης και αξιολόγησης της χωροθέτησης ασύρματων δικτύων αισθητήρων, με βασικό κριτήριο την επίτευξη ιδανικής γεωμετρίας.

Η ολοκληρωμένη διαδικασία για τη χωροθέτηση κόμβων σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων 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).
- Η περιοχή μελέτης μοντελοποιείται ως ένα πολύγωνο και οι θέσεις εγκατάστασης ως σημεία εντός αυτής. Έτσι το πρόβλημα γίνεται γεωμετρικό.
- 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 (δηλαδή οι εφικτές) θέσεις, προσδιορίζοντας το πλησιέστερο υπαρκτό σημείο τοποθέτησης, εφ' όσον για την τοποθέτηση των αισθητήρων ισχύουν περιορισμοί ως προς τις θέσεις εγκατάστασης.
- Η διαδικασία χωροθέτησης μπορεί να σταματήσει ακόμη και στο πρώτο στάδιο και οι αισθητήρες να τοποθετηθούν στις θέσεις που προκύπτουν από αυτό.
- Μέσω του αλγορίθμου πραγματοποιείται αξιολόγηση της μεθοδολογίας με επιλεγμένες μετρικές.

Η διαδικασία αυτή, υλοποιείται από το λογισμικό OptEval (Optimization – Evaluation), το οποίο δομήθηκε στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής, προκειμένου να συνεισφέρει στην ολοκληρωμένη και αυτοματοποιημένη διαδικασία της χωροθέτησης και αξιολόγησης ενός δικτύου αισθητήρων. Η εφαρμογή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε οποιοδήποτε αντίστοιχο πρόβλημα χωροθέτησης με ή χωρίς περιορισμούς. [Ηλιοδρομήτης,2017]

## 2.3 Ο αλγόριθμος μελέτης - έκδοση 2

Το λογισμικό OptEval απαιτούσε ως μια εκ των παραμέτρων εισαγωγής από τον χρήστη, τον ακριβή αριθμό επαναλήψεων των διαδικασιών του λογισμικού προκειμένου να καταλήξει στις καλύτερες δυνατές θέσεις τοποθέτησης των αισθητήρων. Κάτι τέτοιο όμως δεν μας εξασφαλίζει πως περαιτέρω επαναλήψεις των διαδικασιών δεν θα οδηγούσαν σε μια καλύτερη κάλυψη και συνεπώς σε μια πιο ιδανική χωροθέτηση για το εκάστοτε σενάριο που εξετάζεται. Ο ευρετικός χαρακτήρας του αλγορίθμου και οι παρατηρήσεις σχετικά με τη συμπεριφορά του έδιναν αποδεκτά αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση που δοκιμάστηκε.

Στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας "Μελέτη της συμπεριφοράς και σύγκλισης ενός αλγορίθμου υπολογιστικής γεωμετρίας για την χωροθέτηση δικτύων ασύρματων αισθητήρων σε μη ελεγχόμενα περιβάλλοντα" [αναφορά στην Αργυρώ] αναζητήθηκαν κριτήρια σύγκλισης για το λογισμικό OptEval, ώστε να μην απαιτείται καθορισμένος αριθμός επαναλήψεων των διαδικασιών προσδιορισμού των καλύτερων θεωρητικών θέσεων

τοποθέτησης αισθητήρων. Προτάθηκε η χρήση της μετρικής Hausdorff στην οποία γίνεται αναφορά εκτενέστερα παρακάτω. [Μπινη,2018]

## 2.4 Εστίαση της παρούσας εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εκτεταμένη μελέτη της συμπεριφοράς της τρέχουσας έκδοσης του ευρετικού αλγορίθμου και του λογισμικού OptEval, με σκοπό την ανάδειξη της συμπεριφοράς του και τη βελτίωσή του. Το λογισμικό OptEval υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής του Α. Ηλιοδρομίτη, και στην συνέχεια μελετήθηκε και βελτιώθηκε από την Α. Μπίνη στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής εργασίας ώστε να υποστηρίζει κριτήριο σύγκλισης. Στις δύο παραπάνω εργασίες το λογισμικό και όλοι οι απαιτούμενοι υπολογισμοί έγιναν στο προγραμματιστικό περιβάλλον της matlab.

Με δεδομένη την ανάγκη να αξιοποιηθούν οι δυνατότητες των ανοικτών συστημάτων, πρώτο βήμα της εργασίας είναι η συγγραφή του λογισμικού σε περιβάλλον python που είναι open source και κάνει το λογισμικό να τρέχει σε οποιοδήποτε απομακρυσμένο server χωρίς την απαίτηση ειδικών αδειών. Στην υλοποίηση αυτή, εν συνεχεία θα εστιάσουμε σε συγκεκριμένες πλευρές που αφορούν τη λειτουργικότητα και την περαιτέρω βελτιστοποίηση του αλγορίθμου, όπως περιγράφεται στις ακόλουθες υπο-ενότητες.

### 2.4.1 Διαδικτυακό περιβάλλον δημιουργίας προβλημάτων χωροθέτησης

Ανάπτυξη διαδικτυακού περιβάλλοντος που θα επιταχύνει την δημιουργία νεκρών ζωνών για την ταχύτερη δημιουργία σεναρίων τυχαίων σημείων. Με αυτό τον τρόπο η δημιουργία σεναρίων απαλλάσσεται από την χρήση του λογισμικού ArcGis που είχε χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία νεκρών ζωνών σε προηγούμενες μελέτες του λογισμικού OptEval.

### 2.4.2 Οπτικοποίηση προβλημάτων χωροθέτησης και βημάτων εκτέλεσης αλγορίθμου

Ανάπτυξη διαδικτυακού περιβάλλοντος το οποίο θα παίρνει τις εικόνες που θα δίνει σαν έξοδος το τροποποιημένο λογισμικό OptEval και θα κάνει υπέρθεση αυτών, για να γίνει πιο κατανοητή η συμπεριφορά του λογισμικού.

### 2.4.3 Προσθήκη νέων κριτηρίων τερματισμού

Στην παρούσα έκδοση το λογισμικό OptEval τερματίζει όταν συγκλίνει η μετρική Hausdorff ή όταν φτάσει ένα συγκεκριμένο πλήθος επαναλήψεων των επαναληπτικών διαδικασιών του και έπειτα υπολογίζει τον τελικό ποσοστό κάλυψης, το οποίο μπορεί να απέχει αρκετά από το επιθυμητό. Στην παρούσα εργασία το λογισμικό τροποποιείται ώστε να τερματίζει μόνο όταν καταφέρει το επιθυμητό ποσοστό κάλυψης, το οποίο εισάγεται από τον χρήστη.

#### 2.4.4 Επέκταση συμπεριφοράς με δυνατότητα δυναμικής προσαρμογής παραμέτρων

Τροποποίηση του λογισμικού OptEval, ώστε να βρίσκει δυναμικά το απαιτούμενο πλήθος αισθητήρων για την επίτευξη του επιθυμητού ποσοστού κάλυψης. Μέχρι την πρότερη έκδοση του λογισμικού ο χρήστης έβαζε σαν παράμετρος στο graphical user interface (gui) της εφαρμογής, το πλήθος των αισθητήρων και το λογισμικό τον ενημέρωνε για το ποσοστό που πέτυχε για δεδομένο πλήθος αισθητήρων. Σε περίπτωση που δεν ικανοποιεί τον χρήστη πρέπει να εισάγει νέο πλήθος αισθητήρων και να ξανατρέξει το λογισμικό από την αρχή.

#### 2.4.5 Εκτέλεση μεγάλου πλήθους σεναρίων σε περιβάλλον High-Performance Computing, καταγραφή, απεικόνιση και μελέτη συμπεριφοράς

Δημιουργία 384 σεναρίων τυχαίων σημείων, που θα οδηγήσουν σε 2304 σεναρίων εκτέλεσης του τροποποιημένου λογισμικού OptEval. Οι κώδικες για την δημιουργία τυχαίων σημείων καθώς και οι εκτελέσεις του τροποποιημένου λογισμικού θα γίνουν με χρήση του HPC του συστήματος Aris με σκοπό την καταγραφή και αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων για την μελέτη της συμπεριφοράς του λογισμικού.



## Κεφάλαιο 3 Στοιχεία Υπολογιστικής Γεωμετρίας

### 3.1 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. [Liebling & Pournin, 2012]

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 19ου αιώνα, 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. 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  $n$  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, & Verschelde, 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 ανοικτό σύνολο  $\Omega \in \mathbb{R}^N$ . Το σύνολο  $\{V_i\}_{i=1}^k$ , καλείται διαμέριση (κατάτμηση) του  $\Omega$ , εάν  $V_i \subset \Omega$ :

$$\alpha) \forall i=1, \dots, k$$

$$\beta) V_i \cap V_j = \emptyset \quad \forall i, j \neq i$$



$$\gamma) \cup_{i=1}^k \overline{V_i} = \overline{\Omega}$$

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

$\underline{\Omega} \in R^N$ . Το πολύγωνο Voronoi,  $\widehat{V}_i$  που αντιστοιχεί στην εστία  $Z_i$ , ορίζεται ως:

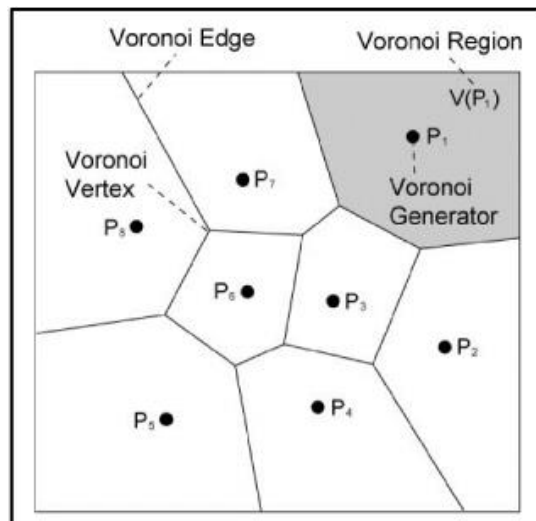
$\widehat{V}_i = \{x \in \Omega \mid \|x - Z_i\| < \|x - Z_j\| \forall j = 1, \dots, k, j \neq i\}$  όπου  $\|\cdot\|$ , η Ευκλείδεια νόρμα (διανυσματική απόσταση) στον  $R^N$ .

**Εστία Voronoi (generator):** Είναι το σύνολο των σημείων  $\{Z_i\}_{i=1}^k$  που ανήκουν στο κλειστό σύνολο  $\underline{\Omega} \in R^N$  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.



Εικόνα 10: Βασικές έννοιες διαγράμματος Voronoi

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

- Αν το πολύγωνο Voronoi που προκύπτει από την εστία  $p_i$ , περιέχει το σημείο  $k$ , τότε η εστία  $p_i$ , βρίσκεται εγγύτερα στο σημείο  $k$ , από οποιαδήποτε άλλη εστία.
- Για συγκεκριμένο σύνολο εστιών  $P = \{p_1, \dots, p_N\} \in R^N$ , το διάγραμμα Voronoi του  $P$ , είναι μοναδικό.

- 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.ά.

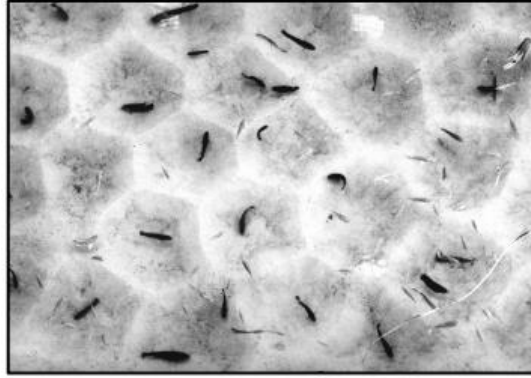
## 3.2 Κεντροειδής διαμέριση Voronoi

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 μεγέθη ακμών.

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]

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*. Τα αρσενικά ψάρια σκάβουν λάκκους αναπαραγωγής στον αμμώδη πυθμένα, μεταφέροντας άμμο από το κέντρο του λάκκου προς τα άκρα, δημιουργώντας τοίχους 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]

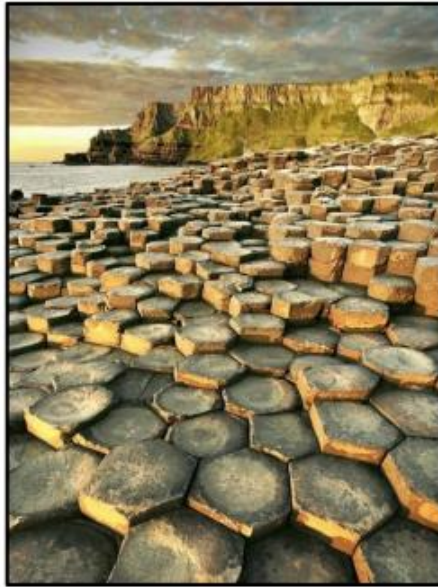


*Εικόνα 11: Λάκκοι αναπαραγωγής ψαριού tilapia*

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η κεντροειδής διαμέριση Voronoi συναντάται και ως μοτίβο στη φύση, όπως για παράδειγμα στο Giant's Causeway. 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 12: Giant's Causeway (Ιρλανδία)

### 3.3 Ο αλγόριθμος του Lloyd για CVT

Ο γνωστότερος αλγόριθμός 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].

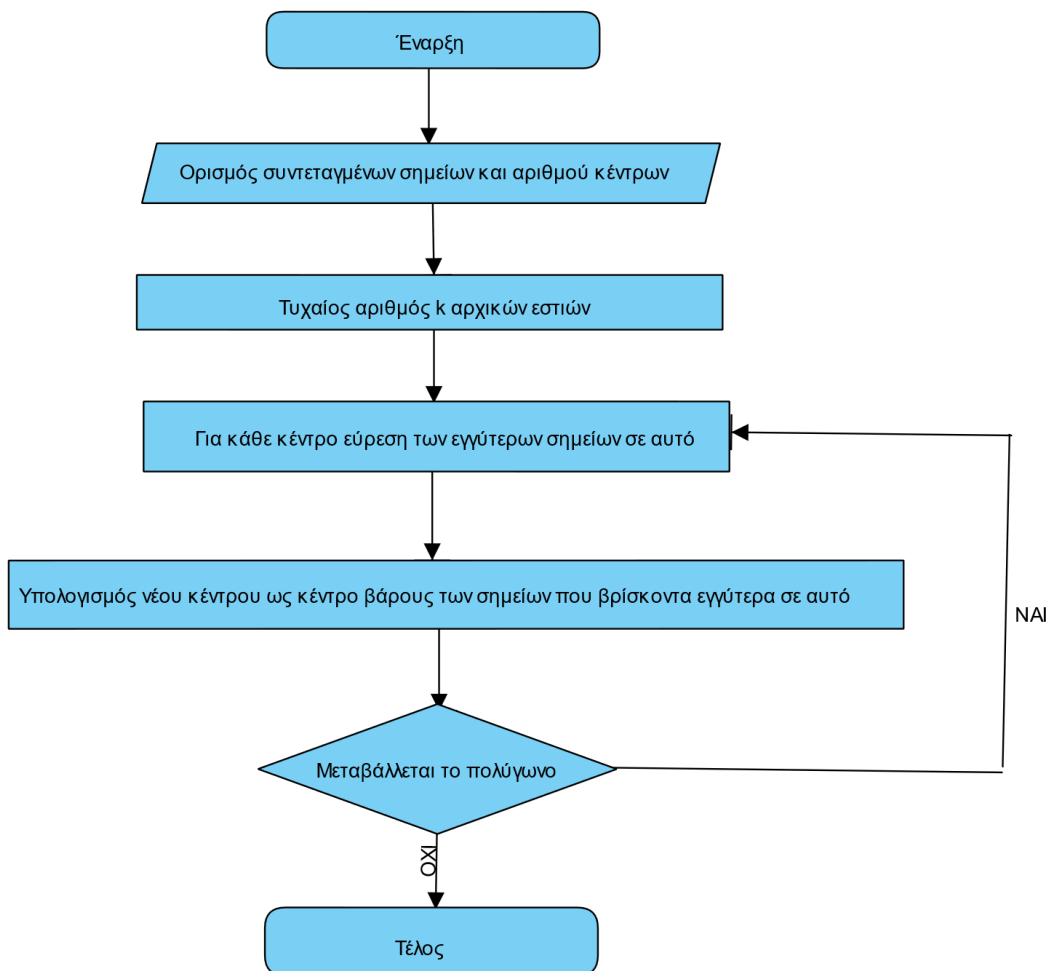
Στη συνέχεια κατασκευάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα Voronoi. Από το σχήμα κάθε πολυγώνου ή τα σημεία που αυτό περιλαμβάνει, υπολογίζεται το κέντρο βάρους κάθε πολυγώνου. Τέλος, η αρχική εστία μετακινείται στο υπολογισθέν κέντρο βάρους. Τα βήματα επαναλαμβάνονται ώσπου η μετακίνηση της εστίας προς τα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

Η μέθοδος μπορεί να παρασταθεί αλγοριθμικά ως εξής :

1. Τυχαίος ορισμός  $k$  αρχικών εστιών  $P=\{p_1, p_2, \dots, p_k\}$
2. Για κάθε  $i \in \{1, \dots, k\}$ , όρισε το πολύγωνο  $V_i$ , ως το σύνολο των σημείων που βρίσκονται εγγύτερα στο  $p_i$ , απ' ότι στο  $p_j, \forall j \neq i$
3. Για κάθε  $i \in \{1, \dots, k\}$ , όρισε το  $p_i$ , 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  $V_i$

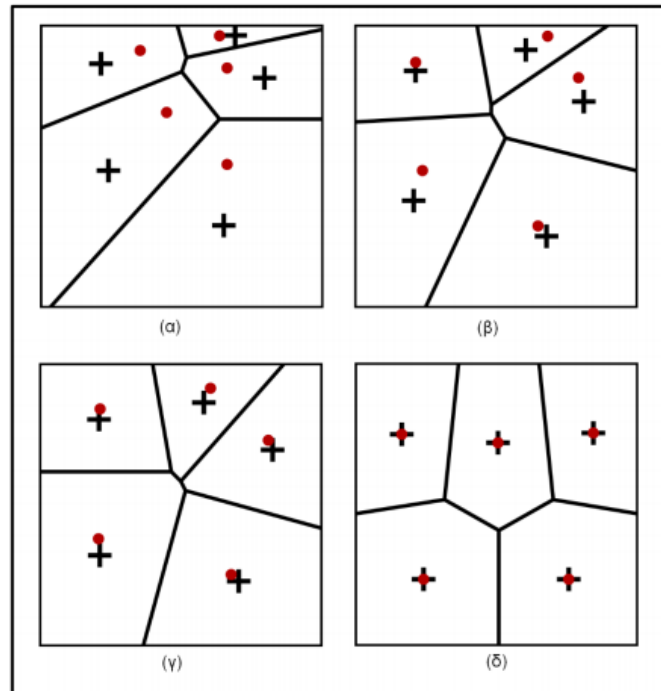
Figure 1: Lloyd's Algorithm

Το διάγραμμα ροής της μεθόδου απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 13: Διάγραμμα ροής αλγόριθμου Lloyd για κατασκευή CVT

Σχηματικά η σταδιακή εξέλιξη του αλγορίθμου παρουσιάζεται στην εικόνα 14:



Εικόνα 14: : Κατασκευή CVT με τον αλγόριθμο του Lloyd, μετά την 1η, 2η, 3η και 15η επανάληψη

Στην εικόνα 14α, έχουν επιλεγεί 5 εστίες (κόκκινες τελείες) που δημιουργούν τα πολύγωνα Voronoi, από τα οποία προκύπτουν τα αντίστοιχα κέντρα βάρους (μαύροι σταυροί). Στην εικόνα 14β έχει ολοκληρωθεί η 2η 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 (εικόνα 14γ) οι εστίες έχουν πλησιάσει πολύ κοντά στα κέντρα βάρους των πολυγώνων. Τέλος, στην εικόνα 14δ (15η επανάληψη) οι εστίες των πολυγώνων ταυτίζονται με τα αντίστοιχα κέντρα βάρους και ο αλγόριθμος τερματίζεται. Τα κεντροειδή πολύγωνα Voronoi έχουν σχηματισθεί.

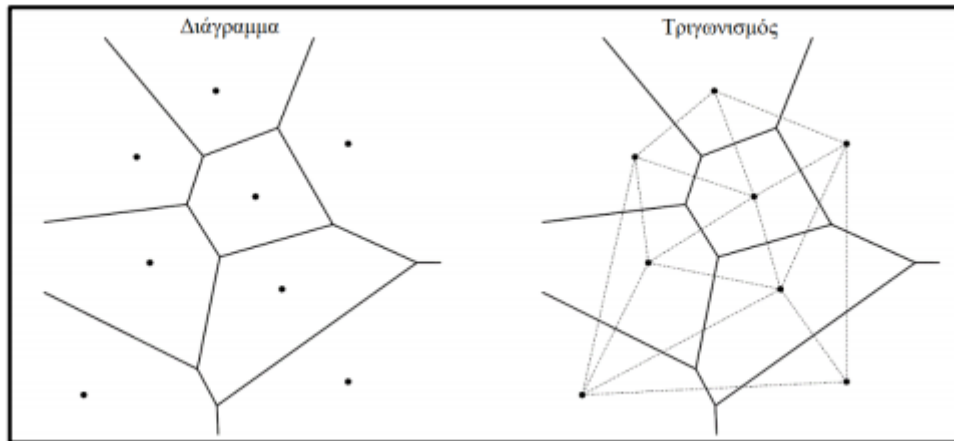
### 3.4 Τριγωνισμός Delaunay

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 (εικόνα 15).



Εικόνα 15: 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:

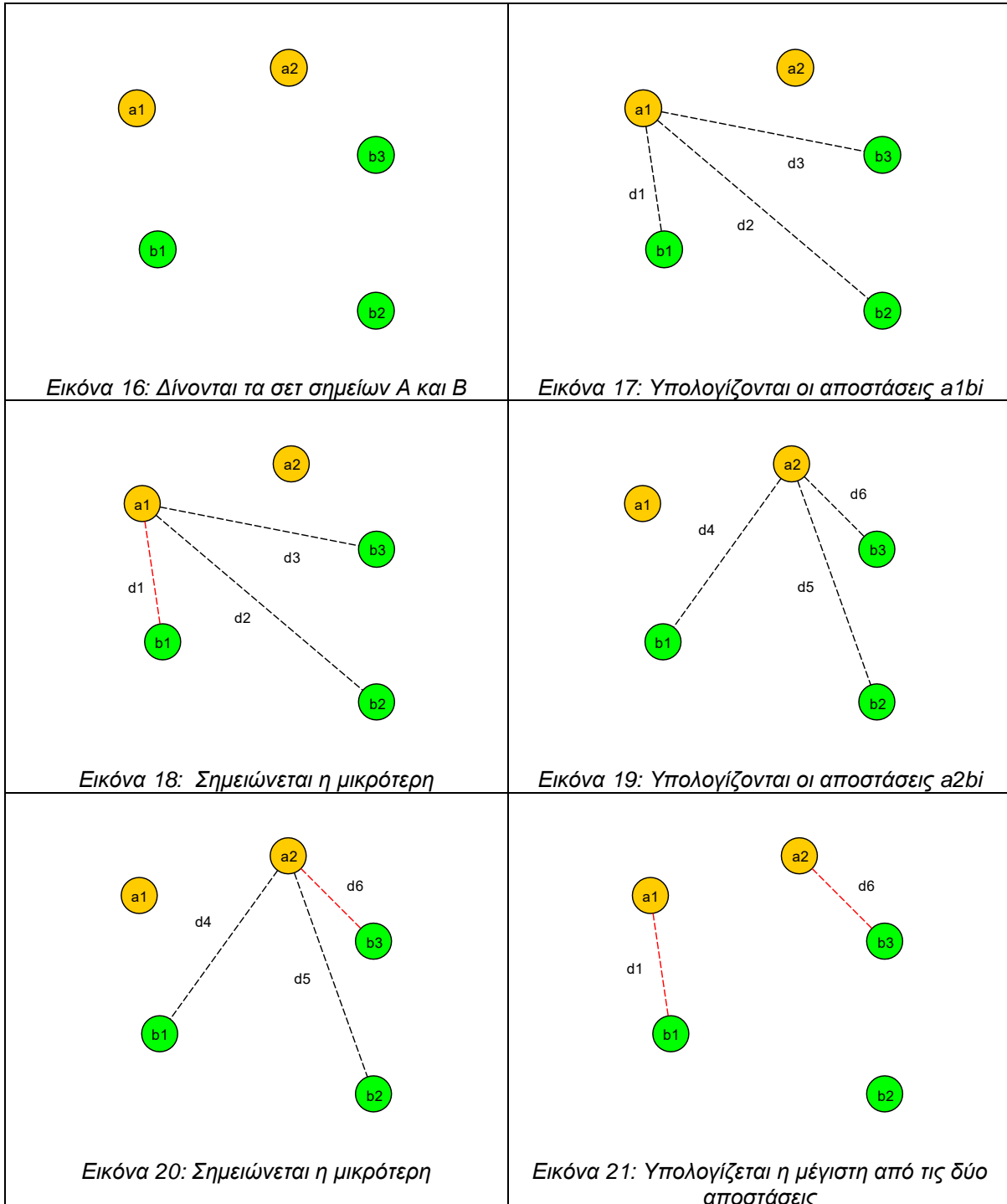
- οι αλγόριθμοι αντιστροφής
- οι αυξητικοί αλγόριθμοι
- οι αλγόριθμοι “divide and conquer”
- ο αλγόριθμος sweep hull. [Cormen, Leiserson, Rivest, & Stein, 2009], [de Oliveira, 2012].

### 3.5 Μετρική Hausdorff

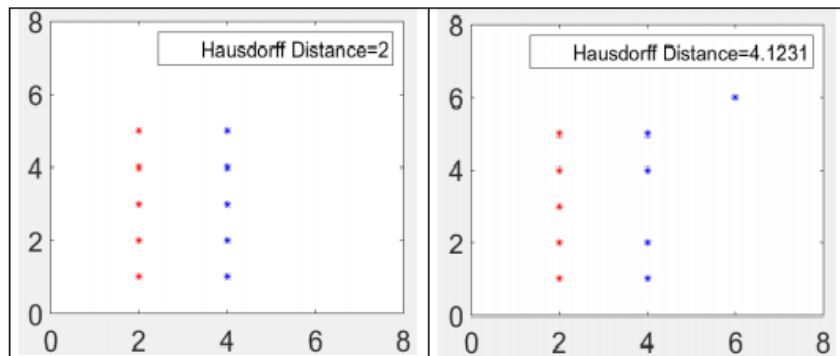
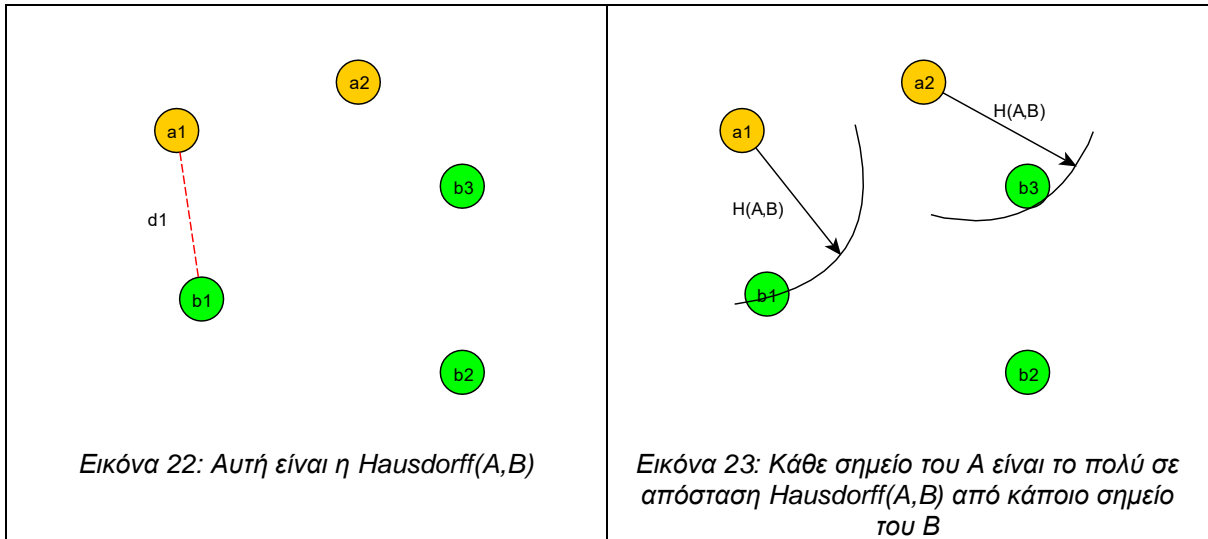
Στα μαθηματικά, η απόσταση Hausdorff, ή η μετρική Hausdorff, που ονομάζεται επίσης απόσταση Pompeiu-Hausdorff, μετρά πόσο απέχουν δύο υποσύνολα ενός μετρικού χώρου το ένα από το άλλο. Ονομάστηκε από τον Felix Hausdorff.

Ανεπίσημα, δύο σύνολα είναι κοντά στην απόσταση Hausdorff αν κάθε σημείο του ενός συνόλου είναι κοντά σε κάποιο σημείο του άλλου συνόλου. Η απόσταση Hausdorff είναι η μεγαλύτερη από όλες τις αποστάσεις από ένα σημείο σε ένα νέφος σημείων στο πλησιέστερο σημείο του άλλου νέφους σημείων, και περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

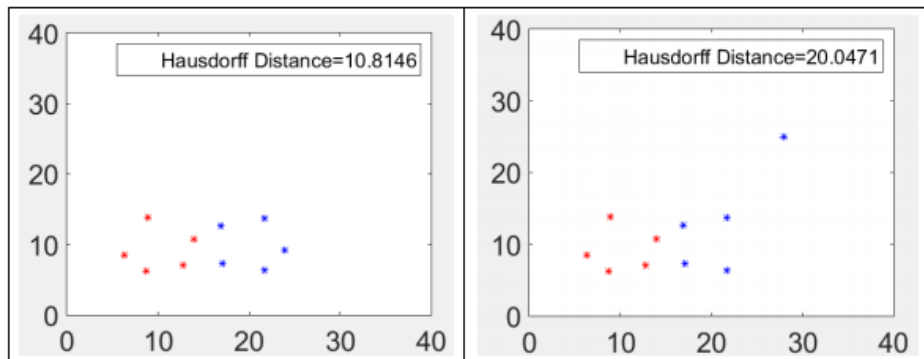
Παρακάτω δίνονται κάποια επεξηγηματικά για την διαδικασία υπολογισμού της απόστασης Hausdorff.







Εικόνα 24: Υπολογισμός Hausdorff distance για σει σημείων που ανήκουν σε ευθείες



Εικόνα 25: Υπολογισμός Hausdorff distance για σει σημείων που ανήκουν σε κύκλους

### 3.6 Cnn (closest neighbour) & Manhattan Distance

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:

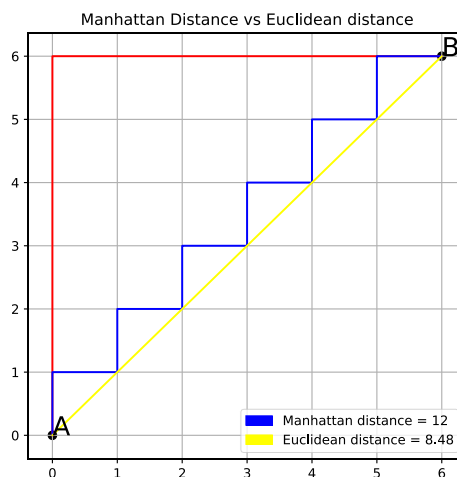
- ενός συνόλου  $S$  σημείων στο χώρο  $\Omega$
- ενός σημείου  $q \in \Omega$

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  $\Omega$ , 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. Μαθηματικά ορίζεται ως εξής:

$$d(A, B) = |X_A - X_B| + |Y_A - Y_B|$$



Εικόνα 26: Διαφορά μεταξύ ευκλείδειας απόστασης και απόστασης Manhattan

# Κεφάλαιο 4 Ο αλγόριθμος OptEval: συμπεριφορά και επεκτάσεις

## 4.1 Χωροθέτηση ασύρματου δικτύου αισθητήρων 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 κατανομημένα 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 αισθητήρων 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 αισθητήρων, 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 πρानές, 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:

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

### 4.1.1 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 υποψήφιοι 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 αντιμετωπιστεί ξεχωριστά. Για τον προσδιορισμό του εμβαδού της έκτασης που καταλαμβάνουν τα σημεία χρησιμοποιείται το κυρτό περίβλημα (convex hull).

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. Παράμετρος επίσης του προβλήματος, αποτελεί η ελάχιστη ποσοστιαία κάλυψη που θέλουμε να πετύχουμε για το εκάστοτε σενάριο χωροθέτησης. Απαιτούμενη από το σύστημα παράμετρος, έπειτα από την τροποποίηση του λογισμικού OptEval είναι και η ελάχιστη απαιτούμενη ποσοστιαία κάλυψη που πρέπει να επιτευχθεί.

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 σύμφωνα την οποία εφόσον το κριτήριο σύγκλισης Hausdorff δεν έχει συγκλίνει, τότε τερματίζει η επαναληπτική διαδικασία για το συγκεκριμένο πλήθος αισθητήρων. Στην περίπτωση που η Hausdorff έχει συγκλίνει, σημαίνει πως δεν θα οδηγηθούμε σε διαφορετική λύση για παραπάνω βήματα εκτέλεσης της διαδικασίας, για δεδομένο πλήθος αισθητήρων.

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
- την ελάχιστη ποσοστιαία κάλυψη που πρέπει να επιτευχθεί
- Το μέγιστο πλήθος επαναλήψεων πριν την περάτωση του αλγορίθμου για δεδομένο πλήθος αισθητήρων

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

$$N = \frac{\text{εμβαδόν έκτασης}}{\pi * R_s^2}$$

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 το σύστημα θα φροντίσει να τον αυξήσει κατάλληλα προκειμένου να επιτευχθεί το απαιτούμενο ποσοστό κάλυψης. 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 όπως αυτή περιγράφεται από τον αλγόριθμο του Loyd, μέχρις ότου να πληρείται ένα εκ των κριτηρίων τερματισμού, είτε της επαναληπτικής διαδικασίας για δεδομένο πλήθος αισθητήρων, είτε το κριτήριο τερματισμού του αλγορίθμου.

Σε κάθε βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας προκύπτουν οι τελικές θέσεις των θεωρητικών σημείων εγκατάστασης των αισθητήρων για την παρούσα κάλυψη, αυτή αποθηκεύεται αν είναι καλύτερη από της προηγούμενες ως προς το ποσοστό κάλυψης που επιτυγχάνει. Έπειτα ελέγχεται το κριτήριο σύγκλισης για να δούμε αν για το δεδομένο πλήθος αισθητήρων μπορούμε να έχουμε κάποια αλλαγή στην κάλυψη. Σε περίπτωση που είτε το πλήθος των επιτρεπτών επαναλήψεων έχει φτάσει, είτε η Hausdorff έχει συγκλίνει, τότε τερματίζει την διαδικασία και γίνεται έλεγχος αν πληρείται το ελάχιστο ποσοστό κάλυψης όπως ζητείται από την εκφώνηση του προβλήματος. Σε περίπτωση που δεν ικανοποιείται η παραπάνω απαίτηση, αυξάνεται το πλήθος των αισθητήρων κατά ένα και επαναλαμβάνεται όλη την διαδικασία από την αρχή. Αν ικανοποιείται η παραπάνω απαίτηση τερματίζει ο αλγόριθμος και έχει προκύψει μια αποδεκτή τοποθέτηση αισθητήρων.

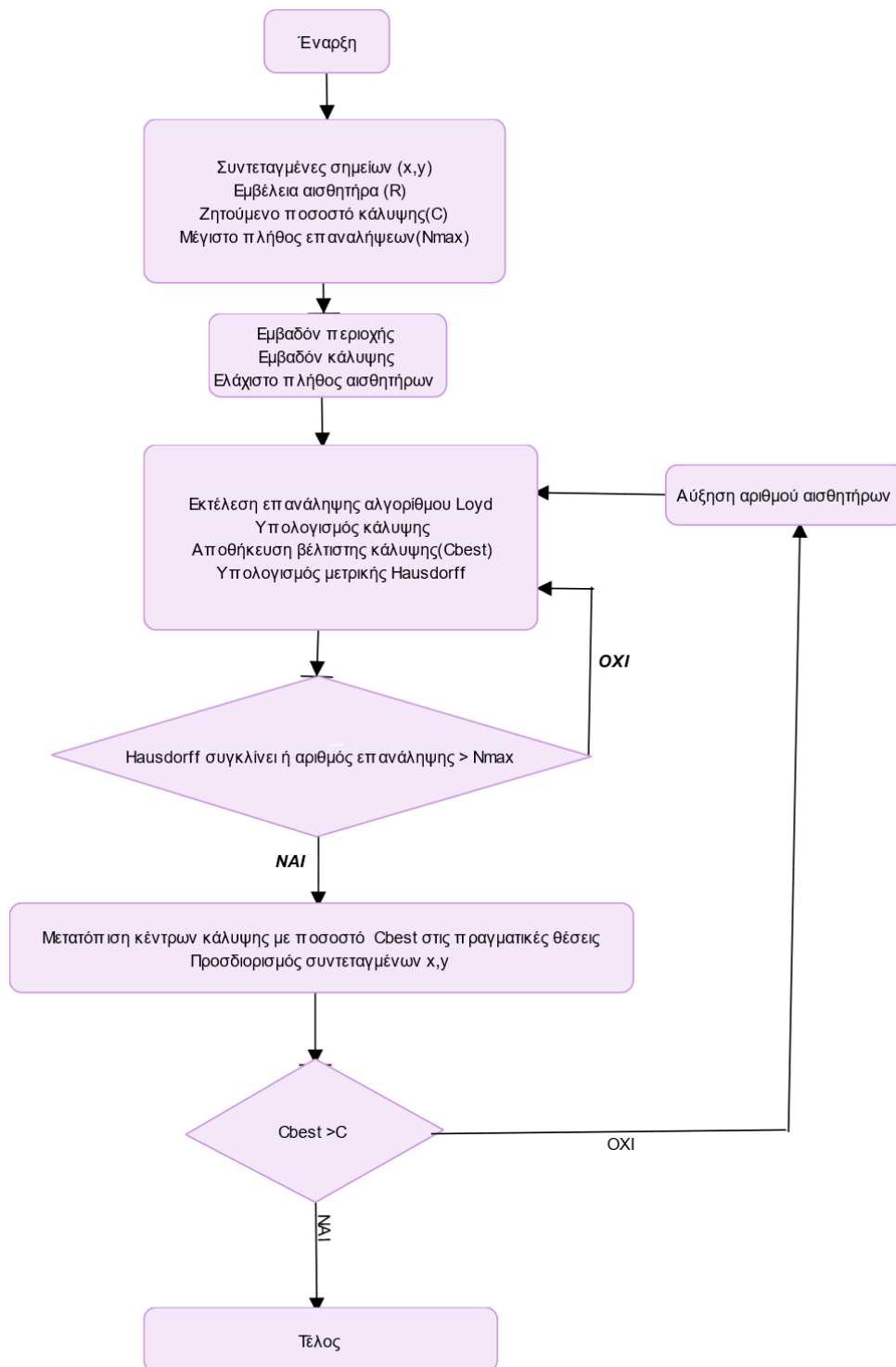
#### 4.1.2 Προσδιορισμός πραγματικών θέσεων εγκατάστασης

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.

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.

Για τα θεωρητικά σημεία για τα οποία δεν έχει επιτευχθεί ταύτιση με κανένα πραγματικό, είναι απαραίτητο να αναζητηθούν τα κοντινότερα σημεία, τα οποία ανήκουν και στο αρχικό σύνολο σημείων. Ταυτόχρονα δεν πρέπει να αλλοιώνεται σε μεγάλο βαθμό 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).

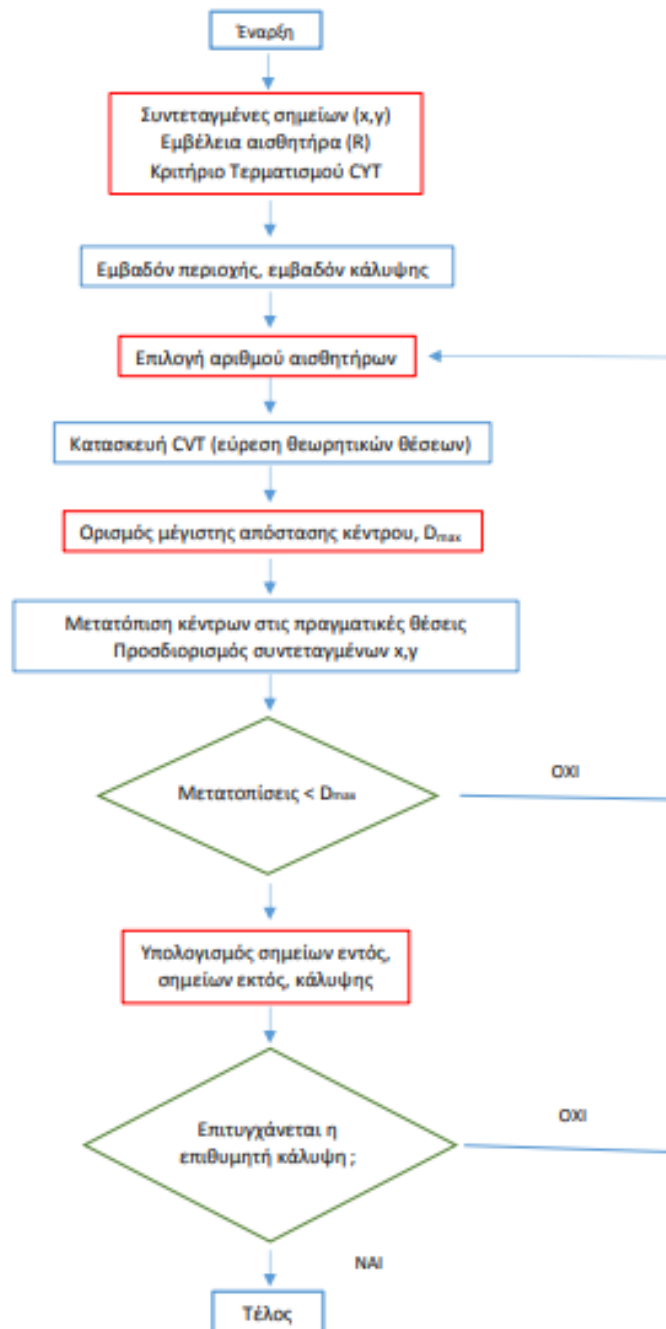
Ακολουθεί το διάγραμμα ροής του τροποποιημένου αλγορίθμου:



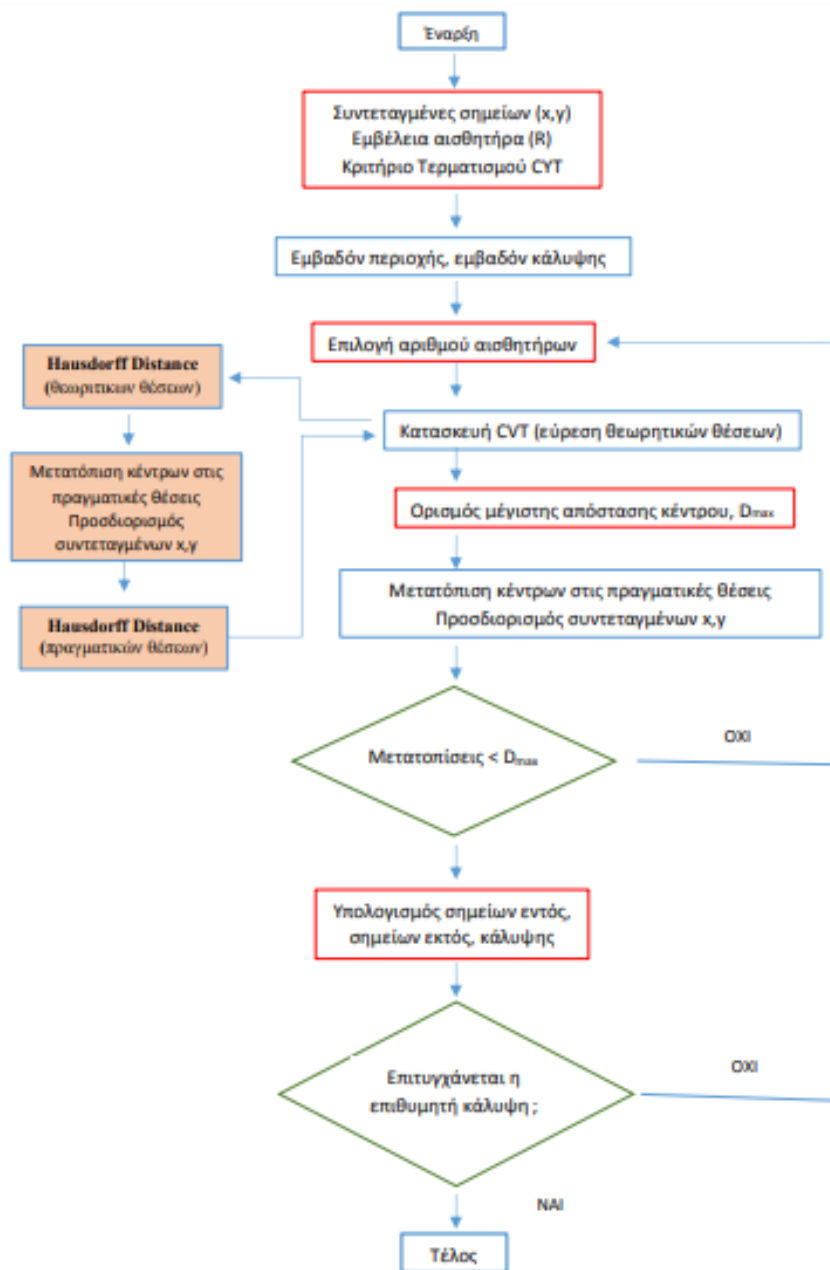
Εικόνα 27: Διάγραμμα ροής τροποποιημένου OptEval

Η λογική που αναφέρθηκε παραπάνω υλοποιήθηκε στην προγραμματιστική γλώσσα python και ο κώδικας είναι διαθέσιμος σε github repository. Ενδεικτικά αναφέρονται οι βασικές βιβλιοθήκες που βοήθησαν στην ανάπτυξη του λογισμικού.

Για λόγους πληρότητας και για να γίνουν πιο κατανοητές οι τροποποιήσεις που έχουν γίνει από την πρώτη έκδοση του λογισμικού OptEval παραθέτονται τα διαγράμματα ροής της πρώτης και της δεύτερης έκδοσης.



Εικόνα 28: Διάγραμμα ροής OptEval έκδοση 1



Εικόνα 29: Διάγραμμα ροής Opteval έκδοση2

#### 4.1.3 Υλοποίηση σε Python

Για τις πράξεις πινάκων και για τον υπολογισμό των μετρικών χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη **numpy**. Για τον υπολογισμό του κυρτού περιβλήματος (convex hull) καθώς και για πράξεις πάνω σε αυτό, έγινε χρήση της βιβλιοθήκης **scipy**. Για την δημιουργία ψευδοτυχαίας ακολουθίας αριθμών έγινε χρήση της βιβλιοθήκης **random**. Για την δημιουργία των εικόνων εξόδου χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη **matplotlib**. Για πράξεις σε αντικείμενο τύπου tuples έγινε χρήση της βιβλιοθήκης **operator**. Για μαθηματικές πράξεις επιλέχθηκε η βιβλιοθήκη **math**. Η δυνατότητα για χρήση των Voronoi και delaunay, καθώς και ο υπολογισμός της Hausdorff έγινε μέσω χρήσης της βιβλιοθήκης **scipy**. Για την δημιουργία αντικειμένων τύπου point και polygon, χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη **shapely**.



Η βιβλιοθήκη **argparse** μας έδωσε την δυνατότητα να περνάμε παραμέτρους του προβλήματος μέσω `command line`. Για τον υπολογισμό του χρόνου εκτέλεσης επιλέχθηκε η βιβλιοθήκη **time**.

Με βάση της παραπάνω βιβλιοθήκες αναπτύχθηκαν οι παρακάτω συναρτήσεις οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της προαναφερθείσας λογικής:

- `parseArguments()` : Καλείται για να πάρει τις παραμέτρους εισόδου από το `command line` και να της αποθηκεύσει σε μεταβλητές προσβάσιμες από το κυρίως πρόγραμμα.
- `initialCoordinates()` : Καλείται για να διαβάσει από το αρχείο εισόδου όλα τα διαθέσιμα τυχαία σημεία που είναι νόμιμα για την τοποθέτηση αισθητήρα και υπολογίζει και το `convex hull`.
- `plotLayer1()` : Καλείται για να σχηματίσει εικόνα που περιέχει τα διαθέσιμα σημεία που μπορούν να τοποθετηθούν αισθητήρες.
- `setBoundary()` : Καλείται για να δημιουργήσει το κυρτό περίβλημα των σημείων και να υπολογίσει το εμβαδόν της περιοχής που θέλουμε να καλύψουμε.
- `plotBoundary()` : Καλείται για να ζωγραφίσει και να αποθηκεύσει εικόνα με το περίβλημα που υπολογίζεται από πάνω.
- `initProblemVariables()` : Καλείται για να υπολογίσει όλες τις παραμέτρους του συγκεκριμένου προβλήματος με βάση τα δεδομένα που από την `parseArguments`, και αρχικοποιεί όλες τις αποθηκευτικές δομές που θα χρησιμοποιήσει το κυρίως πρόγραμμα.
- `findEachCoordsCloserSensor()` : Καλείται για να βρεί για κάθε διαθέσιμο σημείο,σε ποιον αισθητήρα είναι πιο κοντά . Πρακτικά υλοποιεί μέρος του αλγορίθμου του Loyd.
- `moveSensorToPolygonCenter()` : Καλείται για να μετατοπίσει της θεωρητικές θέσεις τοποθέτησης των αισθητήρων στο κέντρο των πολυγώνων που ορίζεται,αν φανταστούμε σαν πολύγωνο την περιοχή που ορίζεται από τα τυχαία σημεία που είναι πιο κοντά σε κάποιον συγκεκριμένο αισθητήρα παρά σε οποιονδήποτε άλλο.
- `calcTelikesTheseis()` : Καλείται για να μετατοπίσει τους αισθητήρες από της θεωρητικές θέσεις σε πραγματικές, τοποθετώντας κάθε αισθητήρα στο πιο κοντινό πραγματικό σημείο.
- `performHaus()` : Καλείται για να υπολογίζει την τιμή της μετρικής Hausdorff μεταξύ δύο διαδοχικών τοποθετήσεων.
- `plotSensorsCenters()` : Καλείται για να ζωγραφίσει τα κέντρα των αισθητήρων σε εικόνα.
- `plotDelanay()` : Καλείται για να ζωγραφίσει το `delanay triangulation` που προκύπτει με κέντρα την τωρινή τοποθέτηση αισθητήρων και τα αποθηκεύει σε εικόνα.

- `plotVoronoi()` : Καλείται για να ζωγραφίσει τα πολύγωνα Voronoi που προκύπτουν με κέντρα την τωρινή τοποθέτηση αισθητήρων και τα αποθηκεύει σε εικόνα.
- `plotActualCenters()` : Καλείται αποκλειστικά για να ζωγραφίσει της τελικές πραγματικές θέσεις τοποθέτησης των αισθητήρων.
- `calculateAndPlotCurrentSensors()` : Καλείται για να σχηματίσει γεωμετρίες τύπου κύκλου που αναπαριστούν την περιοχή κάλυψης του αισθητήρα καθώς και για την αποθηκεύσει σε εικόνα
- `calcEfedriaKalipsi()` : Καλείται για να υπολογίζει την εφεδρεία και το ποσοστό κάλυψης την εκάστοτε τοποθέτησης, καθώς και σε περίπτωση που είναι καλύτερη από κάθε προηγούμενη τοποθέτηση να την αποθηκεύσει ως σημείο αναφοράς.
- `plotKalipsi()` : Καλείται για να ζωγραφίσει με διαφορετικό χρώμα τα σημεία που καλύπτονται από αισθητήρες από ότι αυτά που δεν τα εμποπτεύει κανένας.
- `calcStdTrigonon()` : Καλείται για να σχηματίσει τα τρίγωνα που προκύπτουν από το delaunay triangulation και να εφαρμόσει μετρικές πάνω σε αυτά .

## 4.2 Λογισμικό δημιουργίας τυχαίων σημείων

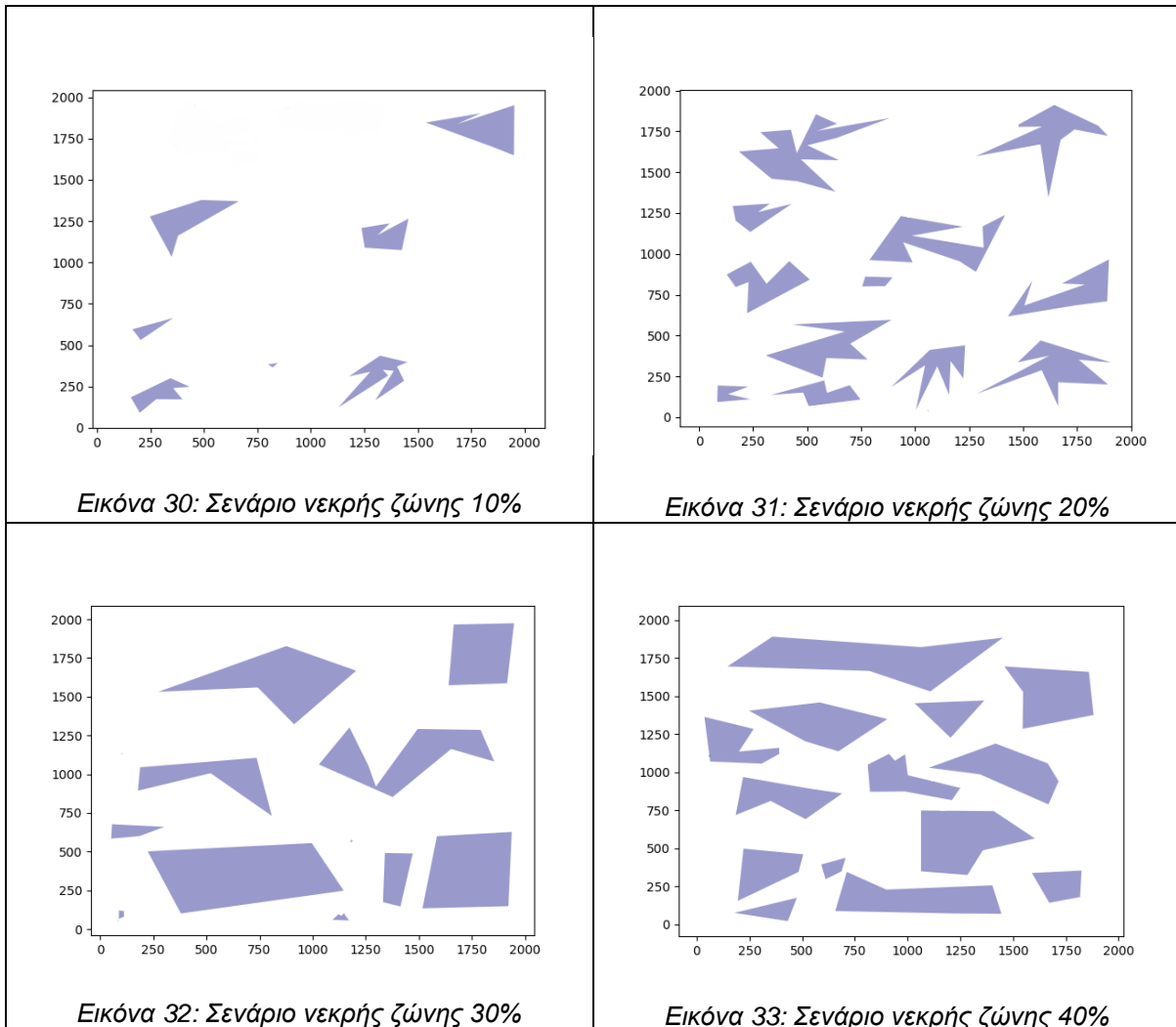
### 4.2.1 Απαιτήσεις κατανομών τυχαίων σημείων

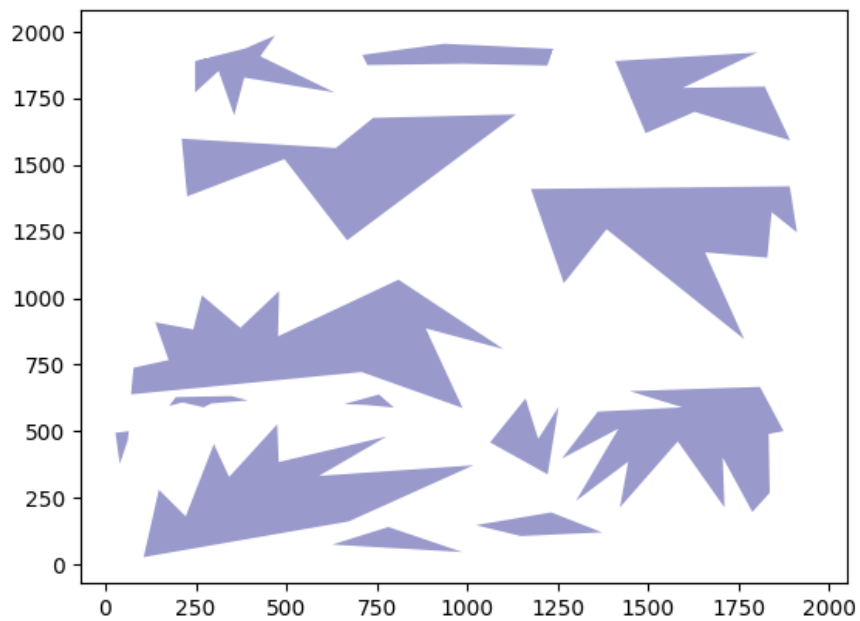
Για την μελέτη της συμπεριφοράς του τροποποιημένου λογισμικού απαιτούνται μετρήσεις στο πεδίο πράγμα που συνεπάγεται κόστος σε χρήμα και χρόνο με αποτέλεσμα να αστοχήσει η συγκεκριμένη μελέτη. Για το λόγο αυτό, αποφασίζεται να δημιουργηθούν σενάρια συνόλων τυχαίων σημείων (ακολουθούμε τυχαία κατανομή) που να προσεγγίζουν τη πραγματικότητα. Για τα σενάρια αυτά, επιβάλλεται να διατηρηθούν σταθερές κάποιες παράμετροι και να είναι μεταβλητές μόνο η πυκνότητα και η διασπορά ώστε να είναι αξιολογήσιμα τα τελικά αποτελέσματα.

Με τον όρο πυκνότητα(DIV) νοείται ο αριθμός των σημείων της εκάστοτε κατανομής σε προκαθορισμένων και σταθερών διαστάσεων επίπεδο. Συγκεκριμένα, η μελέτη γίνεται στο επίπεδο (δύο διαστάσεις) και όχι ο χώρος (τρεις διαστάσεις). Με τον όρο διασπορά των σημείων(M), νοείται η ελάχιστη επιτρεπόμενη απόσταση των σημείων της περιοχής μελέτης. Επεξηγηματικά, η παράμετρος αυτή δεν μπορούσε να θεωρηθεί μέχρι τώρα ως χαρακτηριστικό του εξεταζόμενο νέφους σημείων, σε αντίθεση με τον αριθμό των σημείων που πάντα είναι γνωστό.

Αποφασίζεται η περιοχή μελέτης να έχει σταθερές διαστάσεις 2000 x 2000 και το ποσοστό κάλυψης καθώς και η ελάχιστη απόσταση των σημείων να αλλάζουν με ίδιο τρόπο στις υποπεριπτώσεις κάθε σεναρίου.Οι μονάδες των σταθερών διαστάσεων μπορεί να είναι οποιαδήποτε μονάδα μήκους. Για την παρούσα εργασία επιλέξαμε το ένα μέτρο ως μονάδα μήκους. Το ποσοστό κάλυψης της περιοχής μελέτης εντάσσεται στις παραμέτρους ώστε να δημιουργηθούν σενάρια που να περιγράφουν της περιπτώσεις μη αξιοποιήσιμων τμημάτων της εκάστοτε περιοχής μελέτης, που, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, θα μπορούσε να

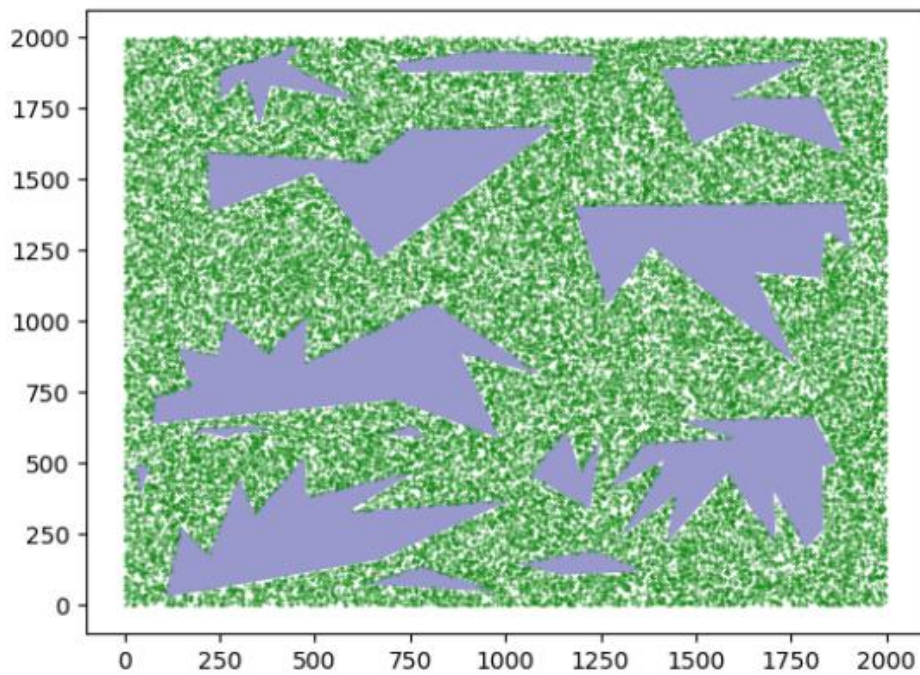
είναι στη πραγματικότητα τα ξέφωτα ενός δάσους ή τα οικοδομικά τετράγωνα μιας πόλης. Στην παρούσα εργασία αυτές οι περιοχές θα ονομάζονται νεκρές ζώνες. Στην μελέτη μας επιλέξαμε να δημιουργήσουμε σενάρια με κάλυψη από νεκρές ζώνες της τάξης των 0%,10%,20%,30%,40%,50% του πεδίου. Αποφασίζεται οι περιοχές αυτές να απεικονίζονται ως πολύγωνα εντός της περιοχής μελέτης, όπου δεν θα μπορούν να τοποθετηθούν αισθητήρες μέσα. Οι νεκρές ζώνες που χρησιμοποιήσαμε αποδίδονται παρακάτω:



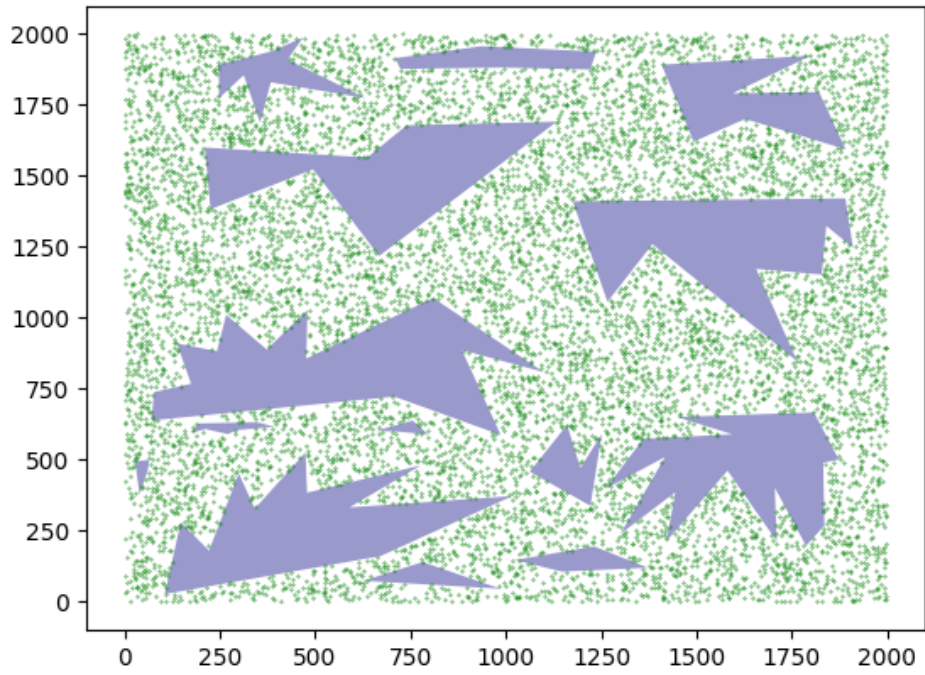


Εικόνα 34: Σενάριο νεκρής ζώνης 50%

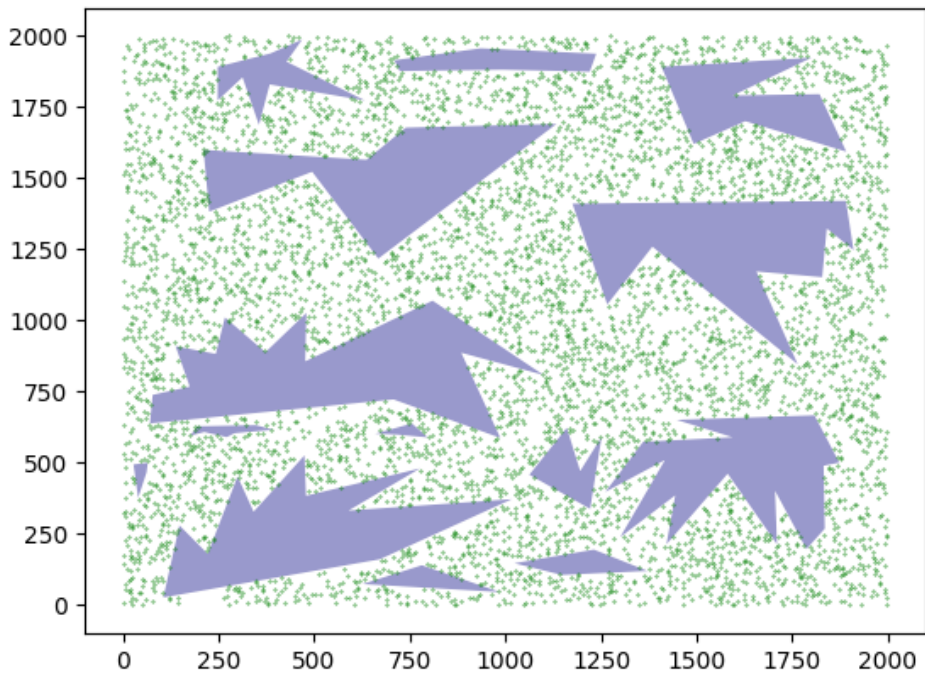
Ενδεικτικά παρατίθενται εικόνες με τυχαία σημεία για το σενάριο κάλυψης 50%. Με γκρι χρώμα αναπαρίστανται οι νεκρές ζώνες του σεναρίου και με πράσινο οι πυκνότητες των σημείων που μπορούν να τοποθετηθούν αισθητήρες.



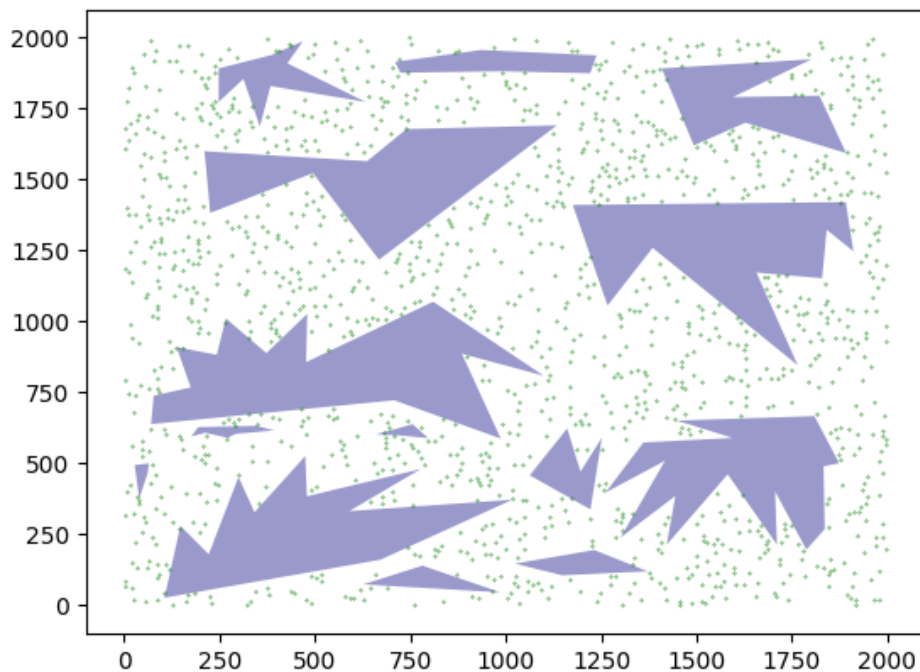
Εικόνα 35: Σενάριο FA\_2000\_2000\_50\_2\_10



Εικόνα 36: Σενάριο FA\_2000\_2000\_50\_4\_10



Εικόνα 37: FA\_2000\_2000\_50\_5\_10



Εικόνα 38: FA\_2000\_2000\_50\_10\_10

#### 4.2.2 Σχεδιασμός σεναρίων εκτέλεσης

Στον ακόλουθο πίνακα δίνονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του κάθε σεναρίου

Scenario ID	OPEN AREA %	min D	Max possible sensors	Div	Scenario sensors	Covered area	Average sensor distance D	stdev D	Dist of weight center from area center		Scenario create time (sec)
									X	Y	
FA_2000_2000_0_1_4	0	1	4.000.000	4	1.000.000	3.995.998,0	1.333,88	666,98	-0,97	-0,62	63.726
FA_2000_2000_0_2_4	0	2	1.000.000	4	250.000	3.995.940,5	1.334,02	666,98	-0,59	-0,79	2.296
FA_2000_2000_0_3_4	0	3	444.400	4	111.100	3.995.894,5	1.335,18	667,72	-0,02	-1,19	1.888
FA_2000_2000_0_4_4	0	4	250.000	4	62.500	3.995.720,5	1.334,55	667,17	0,44	-1,17	623
FA_2000_2000_0_5_4	0	5	160.000	4	40.000	3.995.405,5	1.333,58	666,63	0,54	1,86	252
FA_2000_2000_0_10_4	0	10	40.000	4	10.000	3.990.757,5	1.337,57	668,76	-6,08	2,49	21
FA_2000_2000_0_15_4	0	15	17.700	4	4.425	3.986.543,5	1.337,08	669,28	4,39	3,44	7
FA_2000_2000_0_20_4	0	20	10.000	4	2.500	3.978.242,0	1.336,16	667,52	2,43	4,44	5
FA_2000_2000_0_30_4	0	30	4.400	4	1.100	3.964.086,5	1.335,65	666,83	-6,22	9,38	4
FA_2000_2000_0_40_4	0	40	2.500	4	625	3.939.136,5	1.342,98	670,10	-23,87	9,42	4
FA_2000_2000_0_50_4	0	50	1.600	4	400	3.915.289,5	1.335,18	664,24	13,72	3,45	3
FA_2000_2000_0_60_4	0	60	1.100	4	275	3.839.908,0	1.342,97	666,25	-17,20	39,21	3
FA_2000_2000_0_70_4	0	70	800	4	200	3.790.955,5	1.353,09	672,12	-8,88	5,72	3
FA_2000_2000_0_80_4	0	80	600	4	150	3.682.404,0	1.340,30	661,14	-14,72	20,75	3
FA_2000_2000_0_90_4	0	90	400	4	100	3.590.746,5	1.322,72	649,05	-76,48	-28,40	3
FA_2000_2000_0_100_4	0	100	400	4	100	3.659.135,5	1.325,75	648,10	-59,49	3,62	3
FA_2000_2000_0_1_6	0	1	4.000.000	6	666.666	3.995.972,5	1.333,36	666,70	0,31	-0,16	23.018
FA_2000_2000_0_2_6	0	2	1.000.000	6	166.666	3.995.753,5	1.333,44	666,71	-1,22	-1,58	4.414
FA_2000_2000_0_3_6	0	3	444.400	6	74.066	3.995.495,5	1.332,11	665,99	-1,03	2,26	840
FA_2000_2000_0_4_6	0	4	250.000	6	41.666	3.995.649,5	1.333,43	666,79	0,91	-0,69	269

Scenario ID	OPEN AREA %	min D	Max possible sensors	Div	Scenario sensors	Covered area	Average sensor distance D	stdev D	Dist of weight center from area center		Scenario create time (sec)
									X	Y	
FA_2000_2000_0_5_6	0	5	160.000	6	26.666	3.993.943,0	1.337,44	668,50	-3,00	-4,05	113
FA_2000_2000_0_10_6	0	10	40.000	6	6.666	3.989.021,0	1.335,13	667,90	5,36	-3,90	10
FA_2000_2000_0_15_6	0	15	17.700	6	2.950	3.981.798,5	1.338,18	669,14	2,74	-11,82	4
FA_2000_2000_0_20_6	0	20	10.000	6	1.666	3.956.515,5	1.327,38	664,45	6,38	1,21	3
FA_2000_2000_0_30_6	0	30	4.400	6	733	3.917.635,5	1.341,51	668,64	-41,73	-25,61	3
FA_2000_2000_0_40_6	0	40	2.500	6	416	3.863.109,5	1.338,99	668,19	34,78	16,46	3
FA_2000_2000_0_50_6	0	50	1.600	6	266	3.848.489,0	1.327,08	656,56	-27,35	14,42	3
FA_2000_2000_0_60_6	0	60	1.100	6	183	3.777.580,5	1.359,59	672,01	-29,96	-16,11	3
FA_2000_2000_0_70_6	0	70	800	6	133	3.642.486,0	1.386,34	679,89	-52,44	4,92	3
FA_2000_2000_0_80_6	0	80	600	6	100	3.686.421,0	1.360,42	682,92	72,34	-42,06	2
FA_2000_2000_0_90_6	0	90	400	6	66	3.269.914,0	1.334,62	655,58	-21,82	13,14	2
FA_2000_2000_0_100_6	0	100	400	6	66	3.533.032,5	1.357,70	681,51	-119,24	-21,50	2
FA_2000_2000_0_1_8	0	1	4.000.000	8	500.000	3.995.963,5	1.334,07	667,00	-1,46	-0,82	17.116
FA_2000_2000_0_2_8	0	2	1.000.000	8	125.000	3.995.735,5	1.333,67	667,01	-1,51	-1,46	2.471
FA_2000_2000_0_3_8	0	3	444.400	8	55.550	3.994.662,0	1.332,94	666,69	1,59	-0,77	474
FA_2000_2000_0_4_8	0	4	250.000	8	31.250	3.994.820,0	1.332,81	666,18	-0,96	-1,08	158
FA_2000_2000_0_5_8	0	5	160.000	8	20.000	3.994.038,5	1.335,67	667,76	-2,27	-0,56	65
FA_2000_2000_0_10_8	0	10	40.000	8	5.000	3.986.090,5	1.341,03	670,31	1,05	3,73	6
FA_2000_2000_0_15_8	0	15	17.700	8	2.212	3.965.163,0	1.342,19	670,54	8,41	13,43	3
FA_2000_2000_0_20_8	0	20	10.000	8	1.250	3.945.118,5	1.334,63	667,24	-9,38	-7,85	3
FA_2000_2000_0_30_8	0	30	4.400	8	550	3.924.053,5	1.336,77	673,35	-5,79	50,57	2
FA_2000_2000_0_40_8	0	40	2.500	8	312	3.813.487,0	1.332,71	664,88	-17,24	10,27	2
FA_2000_2000_0_50_8	0	50	1.600	8	200	3.802.363,0	1.362,17	673,85	21,17	-13,82	2
FA_2000_2000_0_60_8	0	60	1.100	8	137	3.768.872,0	1.363,76	680,00	55,60	30,36	2
FA_2000_2000_0_70_8	0	70	800	8	100	3.640.610,5	1.370,17	667,05	-27,78	24,18	2
FA_2000_2000_0_80_8	0	80	600	8	75	3.435.802,5	1.355,81	670,83	-74,65	-48,43	2
FA_2000_2000_0_90_8	0	90	400	8	50	3.502.324,0	1.380,52	687,15	-45,14	52,04	2
FA_2000_2000_0_100_8	0	100	400	8	50	3.011.775,0	1.303,20	643,37	88,78	-72,10	2
FA_2000_2000_0_1_10	0	1	4.000.000	10	400.000	3.995.920,0	1.334,02	666,90	0,64	-1,22	13.165
FA_2000_2000_0_2_10	0	2	1.000.000	10	100.000	3.995.659,5	1.332,41	666,33	0,36	-2,38	1.579
FA_2000_2000_0_3_10	0	3	444.400	10	44.440	3.995.224,0	1.336,72	668,43	-2,60	-0,11	305
FA_2000_2000_0_4_10	0	4	250.000	10	25.000	3.994.345,5	1.331,55	665,73	-0,62	-3,01	100
FA_2000_2000_0_5_10	0	5	160.000	10	16.000	3.992.873,5	1.332,22	666,00	3,38	-2,97	43
FA_2000_2000_0_10_10	0	10	40.000	10	4.000	3.972.607,0	1.333,05	665,67	-1,92	-2,64	5
FA_2000_2000_0_15_10	0	15	17.700	10	1.770	3.971.369,0	1.323,48	661,91	-5,62	14,02	3
FA_2000_2000_0_20_10	0	20	10.000	10	1.000	3.938.988,5	1.331,67	662,23	20,69	13,46	3
FA_2000_2000_0_30_10	0	30	4.400	10	440	3.888.691,0	1.350,10	676,55	-3,22	13,95	2
FA_2000_2000_0_40_10	0	40	2.500	10	250	3.811.012,0	1.332,44	660,77	8,76	-30,44	2
FA_2000_2000_0_50_10	0	50	1.600	10	160	3.727.561,0	1.350,96	667,62	-2,67	-14,58	2
FA_2000_2000_0_60_10	0	60	1.100	10	110	3.586.576,5	1.310,64	643,23	37,75	-19,63	2
FA_2000_2000_0_70_10	0	70	800	10	80	3.395.461,5	1.326,58	657,40	87,14	-47,02	2
FA_2000_2000_0_80_10	0	80	600	10	60	3.322.738,0	1.312,55	657,92	111,52	68,17	2
FA_2000_2000_0_90_10	0	90	400	10	40	3.120.551,5	1.361,15	663,59	42,53	146,33	2
FA_2000_2000_0_100_10	0	100	400	10	40	3.316.170,5	1.451,56	720,07	59,45	-46,80	2
FA_2000_2000_10_1_4	10	1	3.600.000	4	900.000	3.995.987,5	1.328,75	663,27	-4,35	-5,60	260.885
FA_2000_2000_10_2_4	10	2	900.000	4	225.000	3.995.907,5	1.327,74	662,95	-4,54	-5,86	7.220
FA_2000_2000_10_3_4	10	3	400.000	4	100.000	3.995.782,0	1.328,52	663,23	-3,22	-5,87	1.591
FA_2000_2000_10_4_4	10	4	225.000	4	56.250	3.995.621,5	1.329,56	663,81	-7,17	-4,51	615
FA_2000_2000_10_5_4	10	5	144.000	4	36.000	3.995.195,0	1.329,42	663,91	-3,83	-4,38	292
FA_2000_2000_10_10_4	10	10	36.000	4	9.000	3.988.120,0	1.329,08	663,58	-9,81	-2,23	115
FA_2000_2000_10_15_4	10	15	16.000	4	4.000	3.984.751,0	1.326,93	661,74	-4,20	-2,41	103
FA_2000_2000_10_20_4	10	20	9.000	4	2.250	3.976.633,0	1.333,04	664,69	-7,29	-2,85	99



Scenario ID	OPEN AREA %	min D	Max possible sensors	Div	Scenario sensors	Covered area	Average sensor distance D	stdev D	Dist of weight center from area center		Scenario create time (sec)
									X	Y	
FA_2000_2000_10_30_4	10	30	4.000	4	1.000	3.944.771,0	1.332,92	663,22	15,35	-13,42	102
FA_2000_2000_10_40_4	10	40	2.200	4	550	3.872.697,0	1.322,02	657,86	-24,71	14,20	99
FA_2000_2000_10_50_4	10	50	1.400	4	350	3.816.511,0	1.342,47	665,04	9,27	6,63	104
FA_2000_2000_10_60_4	10	60	1.000	4	250	3.810.489,0	1.348,40	664,96	3,54	-21,46	102
FA_2000_2000_10_70_4	10	70	700	4	175	3.818.000,0	1.361,16	673,17	11,64	11,35	102
FA_2000_2000_10_80_4	10	80	500	4	125	3.747.126,5	1.361,02	671,21	-1,39	32,09	101
FA_2000_2000_10_90_4	10	90	400	4	100	3.621.632,5	1.353,95	676,23	-28,93	19,18	99
FA_2000_2000_10_100_4	10	100	300	4	75	3.562.011,0	1.363,45	669,31	12,99	46,76	100
FA_2000_2000_10_1_6	10	1	3.600.000	6	600.000	3.995.967,0	1.327,80	662,80	-4,96	-5,98	54.819
FA_2000_2000_10_2_6	10	2	900.000	6	150.000	3.995.857,5	1.328,46	662,92	-3,92	-5,68	3.301
FA_2000_2000_10_3_6	10	3	400.000	6	66.666	3.995.175,0	1.328,87	662,94	-5,45	-7,80	722
FA_2000_2000_10_4_6	10	4	225.000	6	37.500	3.995.728,0	1.329,31	663,95	-4,29	-3,32	292
FA_2000_2000_10_5_6	10	5	144.000	6	24.000	3.994.021,5	1.327,55	662,97	-6,02	-5,57	183
FA_2000_2000_10_10_6	10	10	36.000	6	6.000	3.988.515,5	1.330,63	663,44	-13,72	-14,27	114
FA_2000_2000_10_15_6	10	15	16.000	6	2.666	3.966.271,5	1.336,94	668,02	-12,60	0,47	107
FA_2000_2000_10_20_6	10	20	9.000	6	1.500	3.969.496,5	1.325,82	661,34	2,58	-2,81	105
FA_2000_2000_10_30_6	10	30	4.000	6	666	3.877.340,0	1.333,66	662,82	-3,06	6,72	107
FA_2000_2000_10_40_6	10	40	2.200	6	366	3.889.489,5	1.294,78	648,96	23,03	8,17	112
FA_2000_2000_10_50_6	10	50	1.400	6	233	3.872.300,0	1.352,01	667,41	-43,38	7,24	111
FA_2000_2000_10_60_6	10	60	1.000	6	166	3.701.760,0	1.342,42	662,79	-68,49	-44,43	106
FA_2000_2000_10_70_6	10	70	700	6	116	3.653.840,5	1.362,90	671,69	-40,19	24,89	109
FA_2000_2000_10_80_6	10	80	500	6	83	3.567.270,5	1.380,52	669,92	41,16	-7,28	116
FA_2000_2000_10_90_6	10	90	400	6	66	3.430.199,0	1.323,39	655,82	7,10	34,02	111
FA_2000_2000_10_100_6	10	100	300	6	50	3.180.141,5	1.339,21	641,72	119,38	-23,70	110
FA_2000_2000_10_1_8	10	1	3.600.000	8	450.000	3.995.921,0	1.327,96	662,76	-4,76	-5,10	40.681
FA_2000_2000_10_2_8	10	2	900.000	8	112.500	3.995.685,0	1.326,78	662,51	-7,37	-6,92	1.877
FA_2000_2000_10_3_8	10	3	400.000	8	50.000	3.995.158,0	1.325,23	661,14	-6,97	-3,24	490
FA_2000_2000_10_4_8	10	4	225.000	8	28.125	3.994.114,0	1.329,52	662,80	-5,83	-8,90	226
FA_2000_2000_10_5_8	10	5	144.000	8	18.000	3.993.100,0	1.328,30	662,95	-4,03	-9,44	155
FA_2000_2000_10_10_8	10	10	36.000	8	4.500	3.986.283,0	1.336,62	668,32	-2,29	-13,34	108
FA_2000_2000_10_15_8	10	15	16.000	8	2.000	3.945.993,0	1.326,58	661,85	-2,07	-18,25	105
FA_2000_2000_10_20_8	10	20	9.000	8	1.125	3.937.734,0	1.343,22	667,88	-9,30	-13,27	108
FA_2000_2000_10_30_8	10	30	4.000	8	500	3.839.446,5	1.333,89	665,64	-7,97	20,97	105
FA_2000_2000_10_40_8	10	40	2.200	8	275	3.819.138,5	1.348,63	665,60	29,73	-16,16	103
FA_2000_2000_10_50_8	10	50	1.400	8	175	3.586.219,0	1.316,82	655,36	-16,50	2,91	108
FA_2000_2000_10_60_8	10	60	1.000	8	125	3.630.865,0	1.322,67	652,53	-25,56	14,12	103
FA_2000_2000_10_70_8	10	70	700	8	87	3.692.192,0	1.376,06	685,13	-10,10	53,87	105
FA_2000_2000_10_80_8	10	80	500	8	62	3.628.040,5	1.321,07	653,93	-74,75	-112,70	102
FA_2000_2000_10_90_8	10	90	400	8	50	3.483.217,0	1.444,28	693,40	-49,69	-51,71	105
FA_2000_2000_10_100_8	10	100	300	8	37	3.046.558,5	1.315,73	668,46	81,14	-47,74	102
FA_2000_2000_10_1_10	10	1	3.600.000	10	360.000	3.995.978,5	1.328,23	663,04	-4,90	-6,11	26.060
FA_2000_2000_10_2_10	10	2	900.000	10	90.000	3.995.721,0	1.329,04	663,07	-6,36	-5,10	1.258
FA_2000_2000_10_3_10	10	3	400.000	10	40.000	3.995.176,0	1.330,47	663,83	-2,06	-3,40	328
FA_2000_2000_10_4_10	10	4	225.000	10	22.500	3.994.913,5	1.327,04	662,90	-1,37	-8,80	176
FA_2000_2000_10_5_10	10	5	144.000	10	14.400	3.990.729,5	1.325,42	661,92	0,86	-12,72	131
FA_2000_2000_10_10_10	10	10	36.000	10	3.600	3.983.181,5	1.330,53	664,90	-5,00	-8,38	101
FA_2000_2000_10_15_10	10	15	16.000	10	1.600	3.967.999,5	1.342,58	671,47	-5,13	-23,74	104
FA_2000_2000_10_20_10	10	20	9.000	10	900	3.948.329,5	1.317,09	658,25	-1,30	9,99	102
FA_2000_2000_10_30_10	10	30	4.000	10	400	3.758.111,0	1.314,95	654,79	23,81	51,28	101
FA_2000_2000_10_40_10	10	40	2.200	10	220	3.725.247,5	1.352,67	670,39	34,80	-6,67	100
FA_2000_2000_10_50_10	10	50	1.400	10	140	3.738.060,0	1.324,76	660,81	29,18	-9,12	103
FA_2000_2000_10_60_10	10	60	1.000	10	100	3.555.182,0	1.301,17	643,90	51,48	28,57	101



Scenario ID	OPEN AREA %	min D	Max possible sensors	Div	Scenario sensors	Covered area	Average sensor distance D	stdev D	Dist of weight center from area center		Scenario create time (sec)
									X	Y	
FA_2000_2000_10_70_10	10	70	700	10	70	3.336.657,0	1.322,80	644,03	-5,16	63,04	101
FA_2000_2000_10_80_10	10	80	500	10	50	3.435.033,5	1.390,16	680,62	1,33	-74,80	100
FA_2000_2000_10_90_10	10	90	400	10	40	3.465.030,0	1.384,38	678,79	-86,59	41,64	100
FA_2000_2000_10_100_10	10	100	300	10	30	2.704.263,0	1.349,68	662,97	76,00	-39,76	99
FA_2000_2000_20_1_4	20	1	3.200.000	4	800.000	3.995.974,0	1.343,10	671,84	2,72	12,99	164.500
FA_2000_2000_20_2_4	20	2	800.000	4	200.000	3.995.870,0	1.343,71	672,25	3,42	14,85	10.587
FA_2000_2000_20_3_4	20	3	355.000	4	88.750	3.995.654,5	1.343,27	672,12	4,02	12,66	3.556
FA_2000_2000_20_4_4	20	4	200.000	4	50.000	3.995.115,5	1.343,59	672,12	1,75	15,78	1.350
FA_2000_2000_20_5_4	20	5	128.000	4	32.000	3.994.567,0	1.343,07	671,76	3,38	13,97	768
FA_2000_2000_20_10_4	20	10	32.000	4	8.000	3.988.587,0	1.349,23	674,34	5,85	18,79	368
FA_2000_2000_20_15_4	20	15	14.200	4	3.550	3.976.938,0	1.340,97	670,48	15,15	21,25	359
FA_2000_2000_20_20_4	20	20	8.000	4	2.000	3.961.872,0	1.357,52	678,40	-6,37	20,18	356
FA_2000_2000_20_30_4	20	30	3.500	4	875	3.928.496,0	1.356,24	676,50	10,16	29,64	346
FA_2000_2000_20_40_4	20	40	2.000	4	500	3.917.494,5	1.346,62	670,51	16,40	-0,84	353
FA_2000_2000_20_50_4	20	50	1.200	4	300	3.850.804,5	1.349,28	666,87	-6,34	38,13	340
FA_2000_2000_20_60_4	20	60	800	4	200	3.707.615,0	1.319,08	655,32	-4,54	4,73	341
FA_2000_2000_20_70_4	20	70	600	4	150	3.686.226,0	1.380,85	677,56	60,21	33,33	345
FA_2000_2000_20_80_4	20	80	500	4	125	3.597.185,0	1.348,75	659,45	29,90	27,13	345
FA_2000_2000_20_90_4	20	90	300	4	75	3.601.562,5	1.431,74	689,11	-45,25	54,08	352
FA_2000_2000_20_100_4	20	100	300	4	75	3.598.071,5	1.379,65	678,47	49,37	-44,30	362
FA_2000_2000_20_1_6	20	1	3.200.000	6	533.333	3.995.955,0	1.344,14	672,37	3,57	13,70	22.111
FA_2000_2000_20_2_6	20	2	800.000	6	133.333	3.995.847,5	1.343,60	671,97	4,20	14,16	2.180
FA_2000_2000_20_3_6	20	3	355.000	6	59.166	3.995.143,5	1.345,17	672,96	3,90	16,02	1.854
FA_2000_2000_20_4_6	20	4	200.000	6	33.333	3.994.956,0	1.341,81	671,07	2,24	10,78	814
FA_2000_2000_20_5_6	20	5	128.000	6	21.333	3.994.709,5	1.343,65	672,15	4,34	16,84	546
FA_2000_2000_20_10_6	20	10	32.000	6	5.333	3.985.594,5	1.350,66	676,18	12,09	15,55	361
FA_2000_2000_20_15_6	20	15	14.200	6	2.366	3.975.286,5	1.335,83	669,01	5,09	4,58	357
FA_2000_2000_20_20_6	20	20	8.000	6	1.333	3.946.782,5	1.352,82	674,74	-3,68	27,35	353
FA_2000_2000_20_30_6	20	30	3.500	6	583	3.881.025,5	1.361,97	679,10	-0,33	-0,91	355
FA_2000_2000_20_40_6	20	40	2.000	6	333	3.773.566,0	1.331,56	661,36	21,36	-1,80	359
FA_2000_2000_20_50_6	20	50	1.200	6	200	3.810.451,0	1.366,10	682,80	48,14	35,64	350
FA_2000_2000_20_60_6	20	60	800	6	133	3.664.808,0	1.374,11	683,77	-31,12	-88,96	349
FA_2000_2000_20_70_6	20	70	600	6	100	3.465.108,5	1.301,78	634,84	41,71	114,52	348
FA_2000_2000_20_80_6	20	80	500	6	83	3.486.517,0	1.383,31	698,28	15,39	20,67	348
FA_2000_2000_20_90_6	20	90	300	6	50	3.267.617,0	1.334,03	662,79	77,98	-9,22	346
FA_2000_2000_20_100_6	20	100	300	6	50	3.307.492,0	1.338,95	663,34	25,70	-65,58	347
FA_2000_2000_20_1_8	20	1	3.200.000	8	400.000	3.995.923,5	1.342,78	671,82	3,54	11,91	16.922
FA_2000_2000_20_2_8	20	2	800.000	8	100.000	3.995.719,0	1.342,40	671,97	1,37	15,16	1.279
FA_2000_2000_20_3_8	20	3	355.000	8	44.375	3.995.158,0	1.342,75	671,84	8,50	13,99	1.215
FA_2000_2000_20_4_8	20	4	200.000	8	25.000	3.994.984,0	1.346,27	672,61	3,08	12,51	609
FA_2000_2000_20_5_8	20	5	128.000	8	16.000	3.992.071,0	1.343,16	671,01	2,75	13,67	465
FA_2000_2000_20_10_8	20	10	32.000	8	4.000	3.978.048,0	1.351,19	675,55	9,33	18,73	356
FA_2000_2000_20_15_8	20	15	14.200	8	1.775	3.956.451,5	1.347,85	669,73	12,37	11,88	351
FA_2000_2000_20_20_8	20	20	8.000	8	1.000	3.956.973,5	1.336,69	667,97	5,56	3,55	354
FA_2000_2000_20_30_8	20	30	3.500	8	437	3.884.784,0	1.360,37	682,63	-6,22	12,50	352
FA_2000_2000_20_40_8	20	40	2.000	8	250	3.811.644,0	1.336,94	669,81	-8,45	59,18	349
FA_2000_2000_20_50_8	20	50	1.200	8	150	3.655.598,5	1.326,29	660,93	-23,40	-49,05	350
FA_2000_2000_20_60_8	20	60	800	8	100	3.646.051,5	1.375,22	677,70	-11,18	77,19	346
FA_2000_2000_20_70_8	20	70	600	8	75	3.699.640,5	1.439,00	717,62	111,52	-22,91	345
FA_2000_2000_20_80_8	20	80	500	8	62	3.457.896,0	1.301,82	644,84	46,18	14,89	342
FA_2000_2000_20_90_8	20	90	300	8	37	2.788.707,0	1.371,02	633,97	5,52	-28,36	343
FA_2000_2000_20_100_8	20	100	300	8	37	2.798.522,0	1.350,28	651,19	80,00	-52,16	340

Scenario ID	OPEN AREA %	min D	Max possible sensors	Div	Scenario sensors	Covered area	Average sensor distance D	stdev D	Dist of weight center from area center		Scenario create time (sec)
									X	Y	
FA_2000_2000_20_1_10	20	1	3.200.000	10	320.000	3.995.960,5	1.344,14	672,18	1,02	13,49	11.714
FA_2000_2000_20_2_10	20	2	800.000	10	80.000	3.995.245,5	1.342,66	671,68	4,20	12,32	879
FA_2000_2000_20_3_10	20	3	355.000	10	35.500	3.994.795,0	1.343,32	672,46	5,74	14,46	878
FA_2000_2000_20_4_10	20	4	200.000	10	20.000	3.994.475,0	1.345,29	672,82	7,20	12,50	517
FA_2000_2000_20_5_10	20	5	128.000	10	12.800	3.991.612,0	1.342,06	671,25	-9,70	13,73	424
FA_2000_2000_20_10_10	20	10	32.000	10	3.200	3.983.169,5	1.346,30	673,87	8,37	21,07	353
FA_2000_2000_20_15_10	20	15	14.200	10	1.420	3.950.427,5	1.342,80	673,87	-4,05	16,93	357
FA_2000_2000_20_20_10	20	20	8.000	10	800	3.904.331,0	1.342,70	672,33	-4,70	-2,19	357
FA_2000_2000_20_30_10	20	30	3.500	10	350	3.811.993,0	1.329,46	660,47	-2,64	55,09	349
FA_2000_2000_20_40_10	20	40	2.000	10	200	3.723.470,5	1.343,53	672,94	50,44	-25,14	346
FA_2000_2000_20_50_10	20	50	1.200	10	120	3.559.197,0	1.323,54	654,25	-30,31	-20,67	347
FA_2000_2000_20_60_10	20	60	800	10	80	3.351.345,0	1.321,90	639,55	45,56	63,36	345
FA_2000_2000_20_70_10	20	70	600	10	60	3.168.530,5	1.282,72	644,10	-94,73	-41,55	342
FA_2000_2000_20_80_10	20	80	500	10	50	3.217.350,0	1.386,67	673,55	17,93	116,39	343
FA_2000_2000_20_90_10	20	90	300	10	30	2.994.875,0	1.318,16	626,23	-0,32	-108,04	345
FA_2000_2000_20_100_10	20	100	300	10	30	2.801.629,0	1.395,17	665,23	-68,00	-133,88	342
FA_2000_2000_30_1_4	30	1	2.800.000	4	700.000	3.995.994,0	1.340,72	672,29	-40,78	41,04	98.885
FA_2000_2000_30_2_4	30	2	700.000	4	175.000	3.995.870,0	1.339,51	671,61	-38,07	40,80	2.832
FA_2000_2000_30_3_4	30	3	311.100	4	77.775	3.995.763,5	1.341,91	672,63	-38,11	41,30	672
FA_2000_2000_30_4_4	30	4	175.000	4	43.750	3.995.212,0	1.341,29	672,35	-38,52	40,72	315
FA_2000_2000_30_5_4	30	5	112.000	4	28.000	3.995.056,0	1.340,82	672,27	-39,08	36,57	218
FA_2000_2000_30_10_4	30	10	28.000	4	7.000	3.985.973,0	1.348,82	675,76	-40,96	45,29	145
FA_2000_2000_30_15_4	30	15	12.400	4	3.100	3.986.437,5	1.344,75	674,86	-52,38	26,83	135
FA_2000_2000_30_20_4	30	20	7.000	4	1.750	3.960.977,5	1.351,26	678,23	-37,15	49,10	131
FA_2000_2000_30_30_4	30	30	3.100	4	775	3.920.621,5	1.324,62	661,87	-49,43	50,10	135
FA_2000_2000_30_40_4	30	40	1.700	4	425	3.876.101,0	1.354,44	675,18	-41,53	38,74	131
FA_2000_2000_30_50_4	30	50	1.100	4	275	3.842.836,5	1.375,95	685,95	-33,66	20,14	143
FA_2000_2000_30_60_4	30	60	700	4	175	3.303.403,5	1.269,66	626,19	-66,27	29,87	131
FA_2000_2000_30_70_4	30	70	500	4	125	3.767.685,0	1.356,04	667,75	-50,76	75,88	129
FA_2000_2000_30_80_4	30	80	400	4	100	3.738.833,5	1.331,70	670,82	28,60	118,72	131
FA_2000_2000_30_90_4	30	90	300	4	75	3.538.475,0	1.390,50	691,10	41,72	45,98	131
FA_2000_2000_30_100_4	30	100	200	4	50	3.162.137,0	1.449,66	697,07	-87,41	42,06	129
FA_2000_2000_30_1_6	30	1	2.800.000	6	466.666	3.995.950,5	1.340,28	672,24	-38,54	40,66	44.857
FA_2000_2000_30_2_6	30	2	700.000	6	116.666	3.995.721,5	1.341,21	672,77	-39,31	42,28	1.404
FA_2000_2000_30_3_6	30	3	311.100	6	51.850	3.995.249,5	1.343,00	673,46	-42,00	43,71	371
FA_2000_2000_30_4_6	30	4	175.000	6	29.166	3.994.727,5	1.339,35	671,98	-42,86	40,52	204
FA_2000_2000_30_5_6	30	5	112.000	6	18.666	3.993.610,5	1.345,32	674,79	-35,76	37,52	160
FA_2000_2000_30_10_6	30	10	28.000	6	4.666	3.981.913,0	1.332,60	668,03	-36,27	40,18	131
FA_2000_2000_30_15_6	30	15	12.400	6	2.066	3.966.430,0	1.332,46	667,60	-52,96	58,90	130
FA_2000_2000_30_20_6	30	20	7.000	6	1.166	3.931.377,5	1.342,65	670,69	-59,90	35,49	129
FA_2000_2000_30_30_6	30	30	3.100	6	516	3.935.461,0	1.344,18	677,98	32,86	50,34	128
FA_2000_2000_30_40_6	30	40	1.700	6	283	3.896.186,5	1.403,06	691,48	-22,94	56,02	130
FA_2000_2000_30_50_6	30	50	1.100	6	183	3.766.182,5	1.318,59	660,35	-29,04	21,72	132
FA_2000_2000_30_60_6	30	60	700	6	116	3.521.174,5	1.341,90	645,85	-81,02	5,26	129
FA_2000_2000_30_70_6	30	70	500	6	83	3.428.571,5	1.380,07	671,87	-57,41	44,09	129
FA_2000_2000_30_80_6	30	80	400	6	66	3.694.854,5	1.390,96	697,05	21,09	-87,66	128
FA_2000_2000_30_90_6	30	90	300	6	50	3.422.865,0	1.346,18	690,19	-118,85	13,52	126
FA_2000_2000_30_100_6	30	100	200	6	33	2.165.573,0	1.185,76	569,25	-4,52	251,86	128
FA_2000_2000_30_1_8	30	1	2.800.000	8	350.000	3.995.937,0	1.340,51	671,97	-40,43	39,93	37.774
FA_2000_2000_30_2_8	30	2	700.000	8	87.500	3.995.447,0	1.338,14	670,99	-38,15	41,60	840
FA_2000_2000_30_3_8	30	3	311.100	8	38.887	3.995.152,0	1.338,92	671,39	-33,43	39,67	265
FA_2000_2000_30_4_8	30	4	175.000	8	21.875	3.993.120,0	1.339,97	671,33	-38,04	41,89	172

Scenario ID	OPEN AREA %	min D	Max possible sensors	Div	Scenario sensors	Covered area	Average sensor distance D	stdev D	Dist of weight center from area center		Scenario create time (sec)
									X	Y	
FA_2000_2000_30_5_8	30	5	112.000	8	14.000	3.994.134,5	1.339,51	672,62	-42,92	47,97	157
FA_2000_2000_30_10_8	30	10	28.000	8	3.500	3.977.077,0	1.338,33	668,29	-27,74	47,12	135
FA_2000_2000_30_15_8	30	15	12.400	8	1.550	3.959.725,5	1.346,42	672,32	-41,93	52,45	133
FA_2000_2000_30_20_8	30	20	7.000	8	875	3.923.112,5	1.343,58	675,24	-57,31	51,60	129
FA_2000_2000_30_30_8	30	30	3.100	8	387	3.839.336,5	1.336,70	666,14	-50,95	60,86	127
FA_2000_2000_30_40_8	30	40	1.700	8	212	3.754.004,5	1.335,07	658,22	-44,39	88,62	130
FA_2000_2000_30_50_8	30	50	1.100	8	137	3.658.853,0	1.399,78	691,91	-60,12	-17,78	131
FA_2000_2000_30_60_8	30	60	700	8	87	3.520.554,0	1.347,72	674,64	53,46	115,34	128
FA_2000_2000_30_70_8	30	70	500	8	62	3.608.614,5	1.351,56	673,49	-160,94	59,36	134
FA_2000_2000_30_80_8	30	80	400	8	50	2.939.636,0	1.215,16	620,03	-122,28	154,17	129
FA_2000_2000_30_90_8	30	90	300	8	37	2.662.199,5	1.430,81	730,54	-236,30	-104,59	128
FA_2000_2000_30_100_8	30	100	200	8	25	2.725.356,5	1.294,92	646,00	213,00	174,21	133
FA_2000_2000_30_1_10	30	1	2.800.000	10	280.000	3.995.946,5	1.339,87	672,04	-40,39	40,15	24.436
FA_2000_2000_30_2_10	30	2	700.000	10	70.000	3.995.757,0	1.339,56	671,57	-36,48	42,68	605
FA_2000_2000_30_3_10	30	3	311.100	10	31.110	3.994.020,5	1.343,82	674,27	-35,92	36,73	220
FA_2000_2000_30_4_10	30	4	175.000	10	17.500	3.992.172,5	1.340,82	672,34	-38,95	42,62	162
FA_2000_2000_30_5_10	30	5	112.000	10	11.200	3.991.631,5	1.340,00	672,52	-39,23	49,67	143
FA_2000_2000_30_10_10	30	10	28.000	10	2.800	3.974.609,0	1.355,83	678,36	-57,19	23,76	133
FA_2000_2000_30_15_10	30	15	12.400	10	1.240	3.929.407,0	1.349,23	675,05	-50,47	37,67	134
FA_2000_2000_30_20_10	30	20	7.000	10	700	3.930.637,0	1.345,64	672,17	-47,09	29,13	134
FA_2000_2000_30_30_10	30	30	3.100	10	310	3.909.953,0	1.364,88	687,20	-61,71	85,70	138
FA_2000_2000_30_40_10	30	40	1.700	10	170	3.734.408,5	1.347,60	674,81	-53,55	37,19	131
FA_2000_2000_30_50_10	30	50	1.100	10	110	3.593.659,5	1.370,49	685,46	-10,65	90,66	133
FA_2000_2000_30_60_10	30	60	700	10	70	3.534.282,0	1.338,17	676,42	31,98	14,72	129
FA_2000_2000_30_70_10	30	70	500	10	50	2.797.829,5	1.271,95	607,27	-170,25	180,97	132
FA_2000_2000_30_80_10	30	80	400	10	40	3.108.387,0	1.377,60	646,56	79,83	54,93	133
FA_2000_2000_30_90_10	30	90	300	10	30	2.974.459,5	1.391,05	669,34	-181,04	75,88	133
FA_2000_2000_30_100_10	30	100	200	10	20	2.174.130,0	1.331,57	681,21	-127,19	211,81	130
FA_2000_2000_40_1_4	40	1	2.400.000	4	600.000	3.995.990,5	1.384,71	696,10	8,88	-2,46	101.839
FA_2000_2000_40_2_4	40	2	600.000	4	150.000	3.995.936,5	1.386,00	696,86	7,07	-4,26	1.907
FA_2000_2000_40_3_4	40	3	266.600	4	66.650	3.995.393,5	1.384,42	696,19	14,32	-4,58	572
FA_2000_2000_40_4_4	40	4	150.000	4	37.500	3.994.546,5	1.381,94	694,46	11,38	-4,46	302
FA_2000_2000_40_5_4	40	5	96.000	4	24.000	3.994.050,0	1.388,33	698,27	9,03	-6,99	226
FA_2000_2000_40_10_4	40	10	24.000	4	6.000	3.983.642,5	1.383,38	695,90	-6,95	0,70	180
FA_2000_2000_40_15_4	40	15	10.600	4	2.650	3.973.992,5	1.384,52	695,85	12,45	-4,44	179
FA_2000_2000_40_20_4	40	20	6.000	4	1.500	3.937.860,0	1.380,96	690,22	-1,55	3,93	176
FA_2000_2000_40_30_4	40	30	2.600	4	650	3.908.010,0	1.395,84	697,07	0,04	41,82	175
FA_2000_2000_40_40_4	40	40	1.500	4	375	3.826.123,5	1.369,21	679,28	27,12	7,28	176
FA_2000_2000_40_50_4	40	50	900	4	225	3.833.741,5	1.427,47	718,10	-21,29	18,31	176
FA_2000_2000_40_60_4	40	60	600	4	150	3.558.931,0	1.358,19	666,45	-21,22	-10,15	175
FA_2000_2000_40_70_4	40	70	400	4	100	3.511.763,0	1.366,38	662,14	47,37	52,24	175
FA_2000_2000_40_80_4	40	80	300	4	75	3.561.947,5	1.397,19	693,05	13,65	43,98	175
FA_2000_2000_40_90_4	40	90	200	4	50	3.158.296,0	1.343,56	653,32	-7,33	-11,00	175
FA_2000_2000_40_100_4	40	100	200	4	50	3.365.822,0	1.434,23	695,31	-18,27	29,14	175
FA_2000_2000_40_1_6	40	1	2.400.000	6	400.000	3.995.943,0	1.383,90	695,86	9,82	-2,19	46.206
FA_2000_2000_40_2_6	40	2	600.000	6	100.000	3.995.445,0	1.385,37	696,35	10,65	-2,76	988
FA_2000_2000_40_3_6	40	3	266.600	6	44.433	3.994.846,5	1.385,86	695,99	7,16	-3,82	339
FA_2000_2000_40_4_6	40	4	150.000	6	25.000	3.994.026,5	1.384,15	695,76	14,60	-9,69	227
FA_2000_2000_40_5_6	40	5	96.000	6	16.000	3.992.873,0	1.380,24	693,64	13,70	-3,55	204
FA_2000_2000_40_10_6	40	10	24.000	6	4.000	3.979.580,0	1.383,19	696,13	0,76	-1,82	181
FA_2000_2000_40_15_6	40	15	10.600	6	1.766	3.951.443,0	1.382,89	695,11	-5,99	-0,97	178
FA_2000_2000_40_20_6	40	20	6.000	6	1.000	3.917.778,5	1.389,65	700,17	-29,15	0,74	175

Scenario ID	OPEN AREA %	min D	Max possible sensors	Div	Scenario sensors	Covered area	Average sensor distance D	stdev D	Dist of weight center from area center		Scenario create time (sec)
									X	Y	
FA_2000_2000_40_30_6	40	30	2.600	6	433	3.824.131,5	1.373,18	690,84	48,60	-35,00	177
FA_2000_2000_40_40_6	40	40	1.500	6	250	3.701.488,5	1.343,57	674,40	-46,12	21,36	174
FA_2000_2000_40_50_6	40	50	900	6	150	3.703.464,5	1.354,77	672,93	-27,19	-25,00	176
FA_2000_2000_40_60_6	40	60	600	6	100	3.591.191,5	1.401,53	680,22	80,43	-43,83	180
FA_2000_2000_40_70_6	40	70	400	6	66	3.393.402,0	1.420,76	684,56	65,96	-0,71	178
FA_2000_2000_40_80_6	40	80	300	6	50	3.397.492,0	1.395,57	705,18	8,94	-13,97	176
FA_2000_2000_40_90_6	40	90	200	6	33	3.073.960,5	1.349,26	667,60	-13,59	-148,68	176
FA_2000_2000_40_100_6	40	100	200	6	33	3.203.325,0	1.503,07	710,21	-30,33	54,50	178
FA_2000_2000_40_1_8	40	1	2.400.000	8	300.000	3.995.913,0	1.383,91	695,84	10,16	-2,65	25.074
FA_2000_2000_40_2_8	40	2	600.000	8	75.000	3.994.956,5	1.384,52	696,11	12,59	-4,53	642
FA_2000_2000_40_3_8	40	3	266.600	8	33.325	3.994.551,5	1.383,10	696,00	14,46	-3,03	272
FA_2000_2000_40_4_8	40	4	150.000	8	18.750	3.993.874,5	1.388,49	698,55	6,84	-2,05	213
FA_2000_2000_40_5_8	40	5	96.000	8	12.000	3.993.238,5	1.382,42	694,79	15,80	-4,88	192
FA_2000_2000_40_10_8	40	10	24.000	8	3.000	3.979.265,0	1.381,51	692,59	15,00	-21,16	177
FA_2000_2000_40_15_8	40	15	10.600	8	1.325	3.957.285,0	1.394,93	699,47	21,00	-28,35	175
FA_2000_2000_40_20_8	40	20	6.000	8	750	3.910.992,0	1.416,11	707,65	-15,30	-14,21	177
FA_2000_2000_40_30_8	40	30	2.600	8	325	3.795.270,5	1.414,34	707,00	-27,40	-40,87	181
FA_2000_2000_40_40_8	40	40	1.500	8	187	3.785.852,5	1.415,58	717,12	-93,85	-125,89	176
FA_2000_2000_40_50_8	40	50	900	8	112	3.557.108,0	1.356,01	678,13	-80,21	-70,35	173
FA_2000_2000_40_60_8	40	60	600	8	75	3.509.232,0	1.406,63	686,20	25,04	-36,04	173
FA_2000_2000_40_70_8	40	70	400	8	50	3.088.037,0	1.432,61	722,05	-26,37	75,71	175
FA_2000_2000_40_80_8	40	80	300	8	37	3.022.280,5	1.439,91	694,45	58,96	-25,70	176
FA_2000_2000_40_90_8	40	90	200	8	25	2.863.445,5	1.432,16	750,32	-39,71	35,86	174
FA_2000_2000_40_100_8	40	100	200	8	25	2.955.552,5	1.505,02	702,24	-19,74	20,68	175
FA_2000_2000_40_1_10	40	1	2.400.000	10	240.000	3.995.922,0	1.385,65	696,50	9,91	-5,95	16.119
FA_2000_2000_40_2_10	40	2	600.000	10	60.000	3.995.096,5	1.384,36	695,48	9,53	-6,37	468
FA_2000_2000_40_3_10	40	3	266.600	10	26.660	3.993.711,5	1.387,58	697,84	9,98	-8,58	239
FA_2000_2000_40_4_10	40	4	150.000	10	15.000	3.991.254,5	1.386,89	697,14	2,73	-1,79	198
FA_2000_2000_40_5_10	40	5	96.000	10	9.600	3.988.779,5	1.384,86	696,67	8,76	1,14	182
FA_2000_2000_40_10_10	40	10	24.000	10	2.400	3.938.588,5	1.384,63	696,45	-1,39	-31,50	171
FA_2000_2000_40_15_10	40	15	10.600	10	1.060	3.939.436,5	1.387,66	695,21	11,49	7,34	174
FA_2000_2000_40_20_10	40	20	6.000	10	600	3.857.619,0	1.376,50	684,25	0,67	40,20	174
FA_2000_2000_40_30_10	40	30	2.600	10	260	3.746.791,0	1.383,79	685,76	59,59	8,41	175
FA_2000_2000_40_40_10	40	40	1.500	10	150	3.642.283,0	1.376,64	693,85	122,16	-6,17	172
FA_2000_2000_40_50_10	40	50	900	10	90	3.403.423,5	1.372,66	673,14	18,15	32,16	182
FA_2000_2000_40_60_10	40	60	600	10	60	3.572.199,5	1.442,08	713,33	-12,17	-146,88	180
FA_2000_2000_40_70_10	40	70	400	10	40	2.792.316,5	1.254,02	608,55	5,74	-227,70	177
FA_2000_2000_40_80_10	40	80	300	10	30	2.843.866,0	1.473,37	742,33	187,05	9,95	175
FA_2000_2000_40_90_10	40	90	200	10	20	2.800.858,0	1.579,24	785,18	178,07	-2,57	177
FA_2000_2000_40_100_10	40	100	200	10	20	2.645.004,0	1.443,19	617,42	-5,65	155,29	175
FA_2000_2000_50_1_4	50	1	2.000.000	4	500.000	3.995.950,0	1.364,11	685,01	5,78	13,41	72.320
FA_2000_2000_50_2_4	50	2	500.000	4	125.000	3.995.822,5	1.364,48	685,47	2,62	17,44	1.449
FA_2000_2000_50_3_4	50	3	222.200	4	55.550	3.995.433,5	1.364,05	684,22	10,20	13,04	1.315
FA_2000_2000_50_4_4	50	4	125.000	4	31.250	3.994.687,0	1.362,68	684,26	4,73	12,90	689
FA_2000_2000_50_5_4	50	5	80.000	4	20.000	3.993.727,0	1.368,65	687,36	16,04	10,45	519
FA_2000_2000_50_10_4	50	10	20.000	4	5.000	3.982.662,0	1.367,48	686,00	1,58	13,35	409
FA_2000_2000_50_15_4	50	15	8.800	4	2.200	3.963.832,5	1.364,44	684,28	8,32	-0,48	407
FA_2000_2000_50_20_4	50	20	5.000	4	1.250	3.939.320,0	1.359,84	680,37	17,87	20,53	400
FA_2000_2000_50_30_4	50	30	2.200	4	550	3.830.164,5	1.343,20	665,84	15,80	70,20	401
FA_2000_2000_50_40_4	50	40	1.200	4	300	3.818.346,0	1.366,01	687,67	-20,00	0,10	394
FA_2000_2000_50_50_4	50	50	800	4	200	3.805.850,0	1.361,31	676,78	-16,87	47,50	403
FA_2000_2000_50_60_4	50	60	500	4	125	3.742.714,5	1.441,34	709,23	58,39	-15,28	400

Scenario ID	OPEN AREA %	min D	Max possible sensors	Div	Scenario sensors	Covered area	Average sensor distance D	stdev D	Dist of weight center from area center		Scenario create time (sec)
									X	Y	
FA_2000_2000_50_70_4	50	70	400	4	100	3.318.496,0	1.338,10	667,64	102,26	2,86	396
FA_2000_2000_50_80_4	50	80	300	4	75	3.221.571,0	1.364,00	650,59	-61,65	-31,75	393
FA_2000_2000_50_90_4	50	90	200	4	50	2.976.330,5	1.290,26	628,22	60,21	-45,88	390
FA_2000_2000_50_100_4	50	100	200	4	50	2.932.434,0	1.304,32	635,03	-228,24	-71,89	396
FA_2000_2000_50_1_6	50	1	2.000.000	6	333.333	3.995.927,0	1.363,95	684,66	6,55	13,00	32.693
FA_2000_2000_50_2_6	50	2	500.000	6	83.333	3.995.518,5	1.363,78	685,00	4,94	11,05	735
FA_2000_2000_50_3_6	50	3	222.200	6	37.033	3.994.627,0	1.364,54	685,26	3,84	18,86	811
FA_2000_2000_50_4_6	50	4	125.000	6	20.833	3.993.889,5	1.365,72	685,44	9,75	14,75	539
FA_2000_2000_50_5_6	50	5	80.000	6	13.333	3.993.170,0	1.371,72	689,06	14,41	2,82	457
FA_2000_2000_50_10_6	50	10	20.000	6	3.333	3.981.269,5	1.373,32	689,99	6,70	26,95	403
FA_2000_2000_50_15_6	50	15	8.800	6	1.466	3.941.159,0	1.357,64	679,02	-11,39	26,51	403
FA_2000_2000_50_20_6	50	20	5.000	6	833	3.935.069,0	1.358,72	684,14	17,62	-12,12	397
FA_2000_2000_50_30_6	50	30	2.200	6	366	3.871.076,5	1.417,12	705,36	13,86	12,23	400
FA_2000_2000_50_40_6	50	40	1.200	6	200	3.767.017,5	1.355,72	679,93	-64,31	31,18	394
FA_2000_2000_50_50_6	50	50	800	6	133	3.719.291,0	1.409,43	699,81	45,21	-20,93	396
FA_2000_2000_50_60_6	50	60	500	6	83	3.421.937,0	1.352,94	693,95	83,46	-68,38	394
FA_2000_2000_50_70_6	50	70	400	6	66	3.628.888,0	1.400,46	697,08	-79,34	56,28	392
FA_2000_2000_50_80_6	50	80	300	6	50	3.476.945,5	1.412,39	691,64	-96,55	127,87	394
FA_2000_2000_50_90_6	50	90	200	6	33	3.186.210,5	1.499,04	715,73	-47,04	95,00	393
FA_2000_2000_50_100_6	50	100	200	6	33	2.459.612,5	1.372,56	745,03	-173,24	66,43	386
FA_2000_2000_50_1_8	50	1	2.000.000	8	250.000	3.995.882,0	1.364,05	684,69	5,08	12,92	18.981
FA_2000_2000_50_2_8	50	2	500.000	8	62.500	3.995.462,5	1.362,65	684,17	3,30	14,79	497
FA_2000_2000_50_3_8	50	3	222.200	8	27.775	3.993.105,5	1.359,60	682,80	7,45	16,39	646
FA_2000_2000_50_4_8	50	4	125.000	8	15.625	3.991.533,0	1.358,77	682,43	23,78	15,52	481
FA_2000_2000_50_5_8	50	5	80.000	8	10.000	3.991.812,0	1.370,64	688,32	-5,06	10,22	432
FA_2000_2000_50_10_8	50	10	20.000	8	2.500	3.954.476,5	1.347,14	678,71	0,28	1,88	404
FA_2000_2000_50_15_8	50	15	8.800	8	1.100	3.921.375,5	1.344,51	674,70	8,17	16,34	395
FA_2000_2000_50_20_8	50	20	5.000	8	625	3.901.813,0	1.358,96	681,21	-62,57	4,89	407
FA_2000_2000_50_30_8	50	30	2.200	8	275	3.769.195,5	1.397,55	694,21	7,79	6,70	399
FA_2000_2000_50_40_8	50	40	1.200	8	150	3.683.903,5	1.336,27	672,18	-37,61	9,72	394
FA_2000_2000_50_50_8	50	50	800	8	100	3.621.307,0	1.396,96	716,78	122,14	26,25	390
FA_2000_2000_50_60_8	50	60	500	8	62	3.058.976,0	1.311,05	656,33	-7,63	-12,41	387
FA_2000_2000_50_70_8	50	70	400	8	50	2.588.348,5	1.236,77	591,55	-8,18	-57,55	391
FA_2000_2000_50_80_8	50	80	300	8	37	3.192.345,0	1.476,62	728,51	158,93	105,83	396
FA_2000_2000_50_90_8	50	90	200	8	25	2.872.597,5	1.465,73	685,55	134,06	-120,72	389
FA_2000_2000_50_100_8	50	100	200	8	25	2.992.786,5	1.531,57	729,78	81,28	153,17	397
FA_2000_2000_50_1_10	50	1	2.000.000	10	200.000	3.995.912,5	1.363,48	684,63	7,59	14,37	11.850
FA_2000_2000_50_2_10	50	2	500.000	10	50.000	3.994.958,5	1.362,43	683,34	6,76	14,84	385
FA_2000_2000_50_3_10	50	3	222.200	10	22.220	3.994.004,0	1.360,49	682,28	5,33	22,23	553
FA_2000_2000_50_4_10	50	4	125.000	10	12.500	3.992.859,5	1.368,19	687,22	7,38	20,39	445
FA_2000_2000_50_5_10	50	5	80.000	10	8.000	3.988.171,0	1.367,39	686,18	9,32	6,49	418
FA_2000_2000_50_10_10	50	10	20.000	10	2.000	3.968.246,5	1.383,90	694,18	6,12	23,35	405
FA_2000_2000_50_15_10	50	15	8.800	10	880	3.921.218,5	1.381,20	690,02	4,86	14,00	398
FA_2000_2000_50_20_10	50	20	5.000	10	500	3.901.832,0	1.359,89	682,79	-30,97	-3,59	395
FA_2000_2000_50_30_10	50	30	2.200	10	220	3.644.480,5	1.389,42	700,71	-24,36	-11,54	398
FA_2000_2000_50_40_10	50	40	1.200	10	120	3.779.473,5	1.394,49	709,73	-84,52	56,87	394
FA_2000_2000_50_50_10	50	50	800	10	80	3.401.400,0	1.364,74	669,42	164,50	71,91	398
FA_2000_2000_50_60_10	50	60	500	10	50	3.205.032,0	1.387,66	659,40	48,69	0,89	389
FA_2000_2000_50_70_10	50	70	400	10	40	2.991.928,0	1.457,63	754,76	45,32	-103,46	391
FA_2000_2000_50_80_10	50	80	300	10	30	2.809.521,5	1.518,35	738,07	39,87	44,48	390
FA_2000_2000_50_90_10	50	90	200	10	20	2.258.401,0	1.344,97	646,25	-98,93	55,47	375
FA_2000_2000_50_100_10	50	100	200	10	20	2.654.908,0	1.447,87	667,71	-116,41	65,82	395

Ως "OPEN AREA %" ορίζεται το συνολικό εμβαδό της περιοχής μελέτης όπου απαγορεύεται η ύπαρξη σημείων. Επιπρόσθετα, με τον όρο "Covered area" ορίζεται το συνολικό εμβαδόν της περιοχής μελέτης όπου επιτρέπεται η ύπαρξη σημείων. Η διασπορά και το πλήθος των σημείων κατανομής του κάθε σεναρίου δίνεται από τις στήλες "MinD" και "N" αντίστοιχα. Με τον όρο "Max points" δίνεται ο μέγιστος αριθμός σημείων που μπορεί να υλοποιηθεί στην κάθε περιοχή μελέτης, λαμβάνοντας υπόψη το ποσοστό κάλυψης του κάθε σεναρίου. Με τον όρο "DIV" που λαμβάνει τις τιμές 4,6,8,10 νοούμε τον αριθμό που θα διαιρέσουμε το "Max points" προκειμένου να έχουμε το τελικό πλήθος εφικτών σημείων τοποθέτησης που είναι ο όρος "Max possible sensors". Οι υπόλοιπες στήλες αποτελούν δεδομένα εξόδου του προγράμματος παραγωγής τυχαίων σημείων και θα αναλυθούν σε επόμενο σκέλος της παρούσας εργασίας .

Πολύ σημαντικό κομμάτι αποτελεί και η κωδικοποίηση των σεναρίων, διότι οι περιπτώσεις είναι 384 στο σύνολό τους. Επίσης, όλα τα αποτελέσματα οπτικοποιούνται και οι εικόνες έχουν ως όνομα αρχείου τον κωδικό του αντίστοιχου σεναρίου(σε μορφή png και svg). Τα δεδομένα αυτά είναι διαθέσιμα στο github repository .

Τέλος, αναφέρεται ότι στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας συντάσσεται λογισμικό, εκ νέου στην προγραμματιστική γλώσσα python, το οποίο δημιουργεί τα σεναρία που θα αποτελέσουν τις κατανομές σημείων που θα αποτελέσουν μια εκ των παραμέτρων εισόδου του λογισμικού OptEval. Στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής εργασίας της Αργυρώ Μ. αναπτύχθηκε λογισμικό παρόμοιας λογικής στην matlab.

## 4.3 Λογισμικό παραγωγής τυχαίων σημείων

### 4.3.1 Γενική περιγραφή

Το λογισμικό παραγωγής τυχαίων σημείων αναπτύχθηκε με την γλώσσα προγραμματισμού python. Σκοπός του είναι η παραγωγή και καταγραφή τυχαίων σημείων στο επίπεδο σε αρχείο txt το οποίο αποτελεί στοιχείο εισόδου του λογισμικού OptEval. Επίσης για κάθε αρχείο txt που παράγεται, έχουμε άλλο ένα αρχείο με μετρικές πάνω σε αυτά τα τυχαία σημεία που παράχθηκαν. Με τον όρο Covered Area νοείται το εμβαδόν του κυρτού περιβλήματος( convex hull) που ορίζεται από το σύνολο των τυχαίων σημείων του εκάστοτε σεναρίου. Ο όρος average sensor distance D αναφέρεται στην μέση τιμή που προκύπτει από τον μέσο όρο όλων των αποστάσεων για κάθε ζεύγος σημείων ( σε manhattan distance). Ο όρος stdevD αναφέρεται στην τυπική απόκλιση του συνόλου των προηγούμενων ζευγών αποστάσεων. Οι όροι Dist of weight center from area center X και Y αναφέρονται στη manhattan distance του κέντρου του πολυγώνου που ορίζεται από όλα τα τυχαία σημεία από το κέντρο του πολυγώνου [(0,0),(0,2000),(2000,2000),(2000,0)]. Τέλος ο όρος t αναφέρεται στον χρόνο εκτέλεσης του συγκεκριμένου σεναρίου, συνυπολογίζοντας τον χρόνο υπολογισμού των προαναφερθέντων μετρικών. Να τονιστεί πως η τελευταία στήλη έχει πολύ μεγάλους αριθμούς, για τα πολύ μεγάλα ως προς Max possible sensors σεναρία, καθώς οι μετρικές average sensor distance D,stdevD έχουν πολύ μεγάλη χρονική πολυπλοκότητα.

Να σημειωθεί πως οπτικοποιούμε, κάθε σενάριο αποθηκεύοντας το, τόσο σε png όσο και σε svg. Αξίζει επίσης να τονιστεί πως μέσω του seed που μας παρέχει η βιβλιοθήκη της rython random καταφέρνουμε να κάνουμε όλα τα σενάρια επαναλήψιμα σε περίπτωση που χρειαστεί να κρατήσουμε και άλλες πληροφορίες για το εκάστοτε σενάριο.

Το εμπόδιο του μεγάλου χρόνου εκτέλεσης οδήγησε στην ανάγκη εύρεσης εναλλακτικής δομής λειτουργίας από τον αρχικό server του ΕΜΠ στο οποίο ξεκίνησε η ανάπτυξη του λογισμικού. Το λογισμικό παραγωγής τυχαίων σημείων στηρίχθηκε στην υπολογιστική πολυπλοκότητα, το οποίο θεωρείται ορθότερο από την προγραμματιστική σκοπιά και η εκτέλεση του αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί στο High Performance Computer του συστήματος Aris. Ως αποτέλεσμα αυτού ήταν η στροφή σε μια λύση που απαιτούσε μεγάλη ποσότητα μνήμης, με αποτέλεσμα να μπορεί να λυθεί το πρόβλημα σε αρκετά μειωμένο χρόνο.

Η σημαντική επιτάχυνση του λογισμικού δημιουργίας τυχαίων σημείων οφείλετε στην δημιουργία ενός πίνακα διαστάσεων 2000 x 2000 με τις τιμές 0,1 και -1. Ο πίνακας αυτός ονομάζεται AREA. Το 0 αντιστοιχεί σε ελεύθερη θέση, το 1 σε θέση που έχει νόμιμο τυχαίο σημείο και το -1 σε θέση όπου είναι εντός των νεκρών ζωνών που αντικατοπτρίζονται ως πολύγωνα. Με αυτόν τον τρόπο διατρέχοντας μια φορά όλα τα πολύγωνα που αντιστοιχούν στις νεκρές ζώνες σχηματίζουμε τον συγκεκριμένο πίνακα που στην παρούσα φάση έχει μόνο τιμές 0,-1.

Στην συνέχεια δημιουργούμε τυχαία σημεία όσα είναι απαιτούμενα από το εκάστοτε σενάριο και τα αποθηκεύουμε σε μια λίστα με σκοπό να ακολουθήσει η από κάτω διαδικασία και επομένως να μείνουν τα νόμιμα σημεία τα οποία και καταλήγουν στο τελικό txt

Για κάθε ένα σημείο της προαναφερθείσας λίστας πρέπει να εξετάσουμε αν ανήκει σε κάποια νεκρή ζώνη η αν δεν πληρεί το κριτήριο της διασποράς του συγκεκριμένου υπό εξέταση σεναρίου. Οι έλεγχοι γίνονται ως εξής:

- Για να δούμε αν ανήκει σε νεκρή ζώνη αρκεί να δούμε την τιμή του συγκεκριμένου κελιού στον πίνακα AREA είναι -1.
- Για να δούμε αν το σημείο που εξετάζουμε είναι νόμιμο ως προς της επιλεγμένη διασπορά αυτό που πρέπει να κάνουμε είναι να δούμε αν ο υπό πίνακας AREA με κέντρο το συγκεκριμένο σημείο και διαστάσεις  $(M-1)*(M-1)$  εξαιρώντας τα κελιά με τιμή -1 έχει άθροισμα 0. Αν έχει άθροισμα 0 σημαίνει πως δεν υπάρχει στον συγκεκριμένο υποπίνακα επιλεγμένο νόμιμο σημείο (θα υπήρχε κελί με τιμή 1).

Με βάση τους παραπάνω ελέγχους τοποθετούνται 1 σε κατάλληλες θέσεις του πίνακα AREA. Στο τέλος για να λάβουμε τα σημεία του σεναρίου διατρέχουμε τον πίνακα AREA και αποθηκεύουμε στο αρχείο τις συντεταγμένες των κελιών με τιμή 1.

Να σημειωθεί πως για περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας εκτέλεσης κάθε πολύγωνο ανατίθεται σε κάποιο process το οποίο δημιουργεί δυναμικά το πρόγραμμα κατά τον χρόνο εκτέλεσης. Είναι κρίσιμο να διευκρινιστεί τι ορίζεται ως πολύγωνο στο λογισμικό αυτό. Ως πολύγωνο ορίζεται το τετράγωνο με κορυφές (0,0) (0,2000) (2000,2000) (2000,0) (0,0) και νεκρές περιοχές τις εκάστοτε συντεταγμένες των πολυγώνων που δημιουργήθηκαν στο javascript frontend που αναλύεται σε επόμενη ενότητα.

Το λογισμικό παραγωγής τυχαίων σημείων παίρνει ως είσοδο:

- Open area
- Covered area
- Max points
- MinD
- Div
- Max possible sensors
- όνομα αρχείου με νεκρές ζώνες

Εν συνεχεία, με βάση τα παραπάνω το λογισμικό δύναται να δημιουργήσει τα ονόματα των σεναρίων και να ταυτοποιήσει κατά μοναδικό τρόπο τα παραγόμενα αρχεία. Με βάση το αρχείο που εισάγουμε που αντιπροσωπεύει τις νεκρές ζώνες το λογισμικό δημιουργεί τον πίνακα AREA. Σε όλες τις περιπτώσεις το μέγεθος του πίνακα AREA παραμένει σταθερά 2000\*2000.

#### 4.3.2 Υλοποίηση σε Python

Η λογική που αναφέρθηκε παραπάνω υλοποιήθηκε στην προγραμματιστική γλώσσα python και ο κώδικας είναι διαθέσιμος σε private github repository . Ενδεικτικά αναφέρονται οι βασικές βιβλιοθήκες που βοήθησαν στην ανάπτυξη του λογισμικού.

Για τις πράξεις πινάκων και για τον υπολογισμό των μετρικών χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη **numpy**. Για την δημιουργία ψευδοτυχαίας ακολουθίας αριθμών έγινε χρήση της βιβλιοθήκης **random**. Για την δημιουργία των εικόνων εξόδου χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη **matplotlib**. Για την αναπαράσταση αντικειμένων γεωμετρίας και πράξεις πάνω σε αυτά, την βιβλιοθήκη **shapely**. Για μαθηματικές πράξεις επιλέχθηκε η βιβλιοθήκη **math**. Η βιβλιοθήκη **argparse** μας έδωσε την δυνατότητα να περνάμε παραμέτρους του προβλήματος μέσω command line. Για τον υπολογισμό του κυρτού περιβλήματος(convex hull) καθώς και για πράξεις πάνω σε αυτό, έγινε χρήση της βιβλιοθήκης **scipy**. Για τον υπολογισμό του χρόνου εκτέλεσης επιλέχθηκε η βιβλιοθήκη **time**. Για την παραλληλοποίηση εκτελούμενων εντολών όπου ήταν δυνατό, έγινε χρήση της βιβλιοθήκης **multiprocessing**.

Με βάση της παραπάνω βιβλιοθήκες αναπτύχθηκαν οι παρακάτω συναρτήσεις οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της προαναφερθείσας λογικής:

- `parseArguments()` : Καλείται για να πάρει τις παραμέτρους εισόδου από το command line και να της αποθηκεύσει σε μεταβλητές προσβάσιμες από το κυρίως πρόγραμμα.
- `initializeVariables()` : Καλείται αμέσως μετά την από πάνω συνάρτηση για να δημιουργήσει όλες τις μεταβλητές προβλήματος που προκύπτουν με βάση την εισαγωγή των παραμέτρων.
- `in_pop(xx, yy, mm)` : Καλείται με ορίσματα την θέση του τυχαίου σημείου που εξετάζουμε καθώς και την παράμετρο minD και απαντάει στο ερώτημα αν το



συγκεκριμένο σημείο έχει άλλο τυχαίο σημείο σε απόσταση μικρότερη η ίση από mind.

- `calcRandomSpots()` : Καλείται με σκοπό να δημιουργήσει κατάλληλο πλήθος τυχαίων σημείων και κάνει χρήση της συνάρτησης `in_ror(xx,yy,mm)` με σκοπό την διερεύνηση της νομιμότητας του εκάστοτε τυχαίου σημείου.
- `calcPolygons()` : Καλείται για να διαβάσει από τα αρχεία της συντεταγμένες των πολυγώνων, να δημιουργήσει τα κατάλληλα αντικείμενα τύπου πολυγώνου.
- `myfunction(mypol)` : Καλείται με όρισμα ένα πολύγωνο και γεμίζει τις θέσεις του πίνακα Area με -1 για τα σημεία που ανήκουν στο συγκεκριμένο πολύγωνο ( νεκρή ζώνη).
- `calcAREAThreads()` : Καλείται προκειμένου να κάνει ανάθεση σε διαφορετικά `processes` την συνάρτηση `myfunction(mypol)` δίνοντας κάθε φοράς ένα διαφορετικό πολύγωνο ως όρισμα, με σκοπό την παραλληλοποίηση της διαδικασίας.
- `plotPolygons()` : Καλείται για να ζωγραφίσει τα πολύγωνα στις τελικές εικόνες.
- `calcSpots()` : Καλείται για να ελέγξει ποια σημεία από αυτά που δημιούργησε η `calcRandomSpots()` ανήκουν σε νεκρές ζώνες.
- `plotAndSaveEverything()` : Καλείται για να ζωγραφίσει κατάλληλα τις εικόνες εξόδου καθώς και την καταγραφή των νόμιμων τυχαίων σημείων του σεναρίου σε αρχείο `txt`.
- `worker(a,b)` : Καλείται παίρνοντας ως είσοδο δύο αριθμούς που αποτελούν δείκτες σε θέσεις του πίνακα με τα νόμιμα σημεία και υπολογίζει μέρος της μετρικής `avD` του συνολικού πίνακα.
- `worker2(a,b,c)` : Καλείται παίρνοντας ως είσοδο δύο αριθμούς που αποτελούν δείκτες σε θέσεις του πίνακα με τα νόμιμα σημεία και έναν ακόμα που αποτελεί την υπολογισμένη μέση τιμή `avD` και στην συνέχεια υπολογίζει μέρος της μετρικής `stDevD`.
- `calcMetrics()` : Καλείται για τον υπολογισμό των μετρικών εξόδου του προγράμματος και χρησιμοποιεί της συναρτήσεις `worker(a,b)`, `worker(a,b,c)` για την επιτάχυνση του υπολογισμού των `avD`,`stDevD` που επιδέχονται παραλληλοποίησης κάνοντας κατάλληλες αναθέσεις σε πλήθος διεργασιών που δημιουργούνται.

#### 4.3.3 Δημιουργία "νεκρών ζωνών"

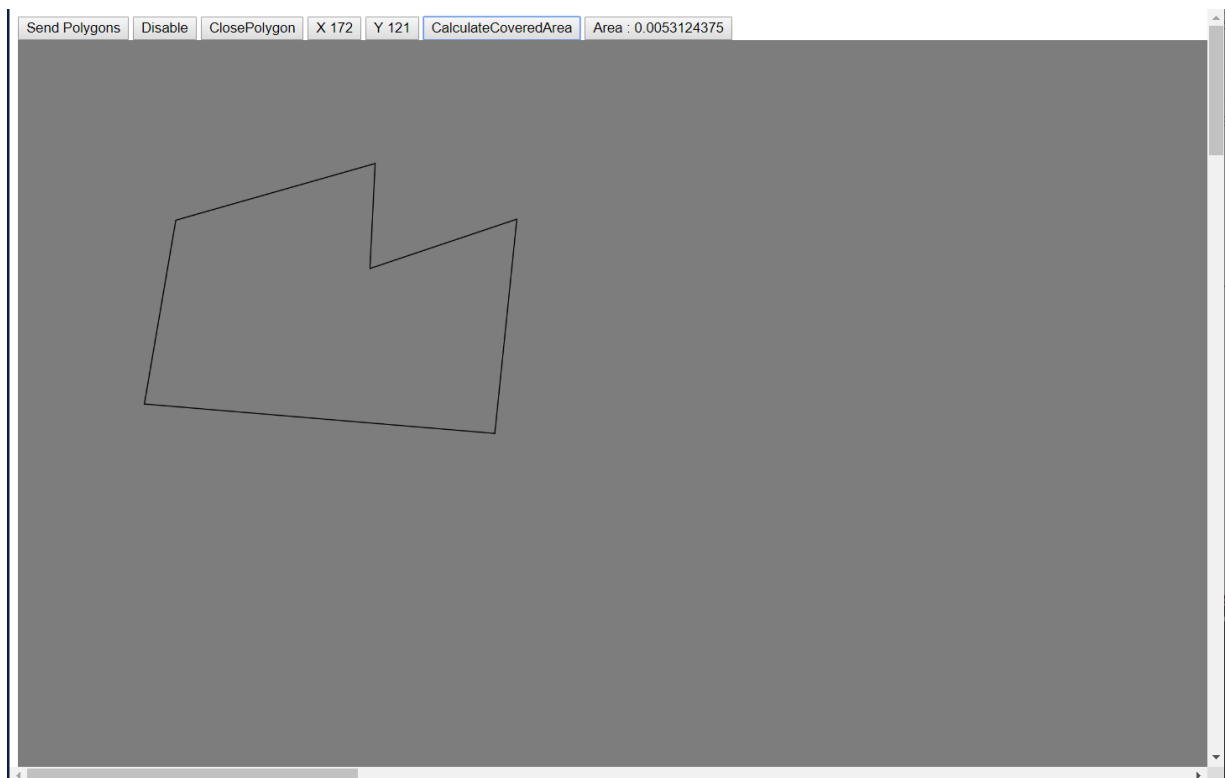
Στα πλαίσια της μεταπτυχιακής διατριβής <<Μελέτη της συμπεριφοράς και σύγκλισης ενός αλγορίθμου υπολογιστικής γεωμετρίας για την χωροθέτηση δικτύων ασύρματων αισθητήρων σε μη ελεγχόμενα περιβάλλοντα>> χρησιμοποιήθηκε το "ArcGIS" για τη δημιουργία των εν λόγω πολυγώνων, εντός επιπέδου 2000 x 2000.

Στην συγκεκριμένη εργασία αναπτύχθηκε διαδικτυακή υπηρεσία που δημιουργεί αρχεία εξόδου που περιέχουν συντεταγμένες πολυγώνων. Το frontend γράφτηκε σε javascript και το backend σε node.js. Πιο συγκεκριμένα βλέποντας το frontend βλέπουμε πως στον χρήστη παρέχονται οι εξής δυνατότητες όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 39: Δυνατότητες λογισμικού παραγωγής νεκρών ζωνών

- Να γνωρίζει που δείχνει το ποντίκι σε εύρος 0,2000 τόσο για την X όσο και για την Y συνιστώσα.
- Να ενεργοποιήσει και να απενεργοποιήσει την διαδικασία σχεδιασμού. Σε περίπτωση που είναι απενεργοποιημένη δεν υπάρχει καμία αλληλεπίδραση μέσω κλικ πάνω στον καμβά.
- Μόλις κλικάρει διαδοχικά δύο σημεία δημιουργείται μια γραμμή μεταξύ των σημείων αυτών, που αντιστοιχεί σε ακμή του πολυγώνου
- Πατώντας το κουμπί close Polygon, το frontend δημιουργεί μια ακμή μεταξύ του πρώτου αποθηκευμένου κλικ που αντιστοιχεί στην αρχή του υπό δημιουργία πολυγώνου και του τελευταίου κλικ πάνω στον καμβά.
- Πατώντας το κουμπί Calculate Area, το frontend αποστέλλει στο backend την λίστα με τα αποθηκευμένα πολύγωνα, το backend υπολογίζει το εμβαδόν κάλυψης και το αποστέλλει πίσω στο frontend για να το γνωστοποιήσει στον χρήστη.
- Πατώντας το κουμπί send Polygons, το frontend στέλνει στο backend την λίστα με τα πολύγωνα και αυτό την αποθηκεύει σε ένα αρχείο με όνομα της μορφής coverX.txt όπου X είναι το ποσοστό κάλυψης που καταλαμβάνουν οι νεκρές ζώνες.



*Εικόνα 40: : Υπηρεσία παραγωγής νεκρών ζωνών*

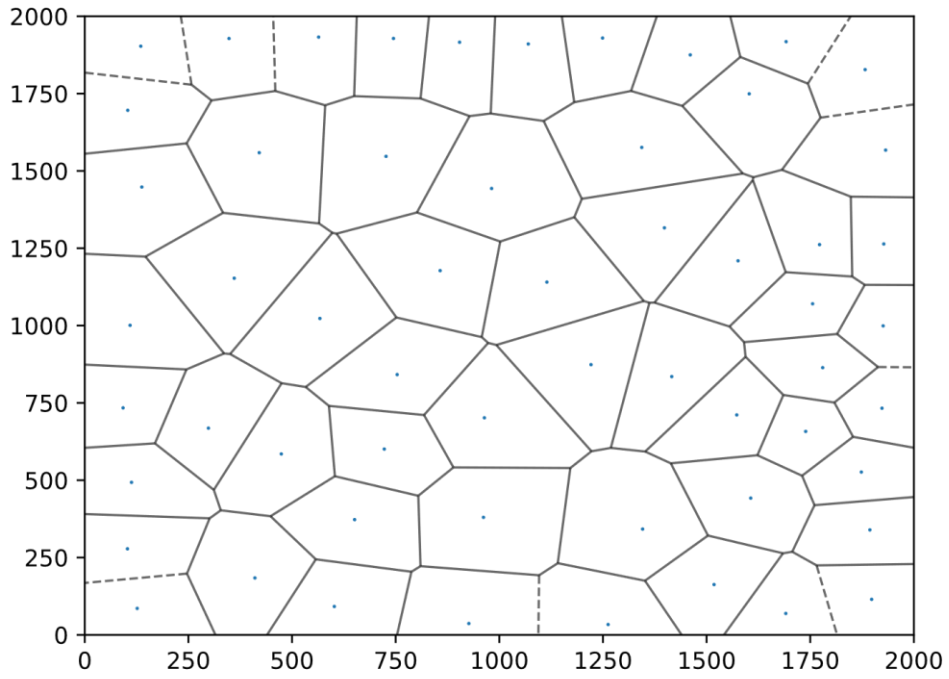
Με αυτό τον τρόπο έχουμε γρήγορα την δημιουργία σεναρίων με νεκρές ζώνες, να σημειωθεί πως σε κάθε βήμα επικοινωνίας μεταξύ frontend και backend αποστέλλεται το κατάλληλο μήνυμα στο χρήστη για να γνωρίζει αν όντως πραγματοποιήθηκε η επιλογή του.

## 4.4 Μια νέα υλοποίηση του OptEval

### 4.4.1 Αποθήκευση δεδομένων εκτέλεσης

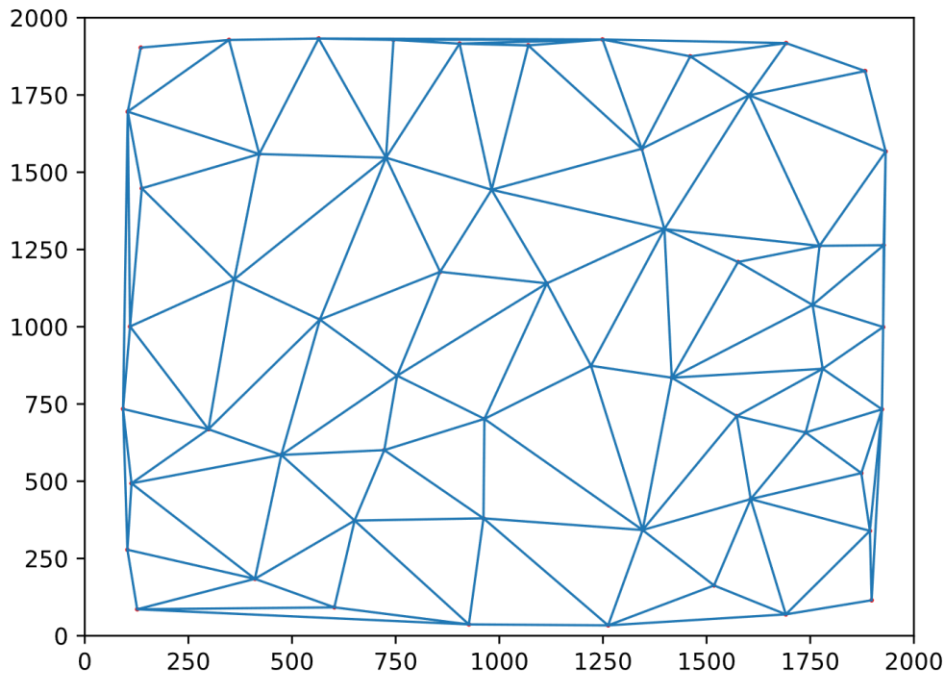
Για κάθε εκτέλεση του λογισμικού Opteval είναι απαραίτητο να κρατάμε κάποια δεδομένα τόσο για την εξαγωγή στατιστικών όσο και για να μπορούμε να οπτικοποιήσουμε πως προοδεύει ο αλγόριθμος σε κάθε βήμα. Για το λόγο αποθηκεύουμε τις εξείς εικόνες σε κάθε βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας:

- Το διάγραμμα Voronoi



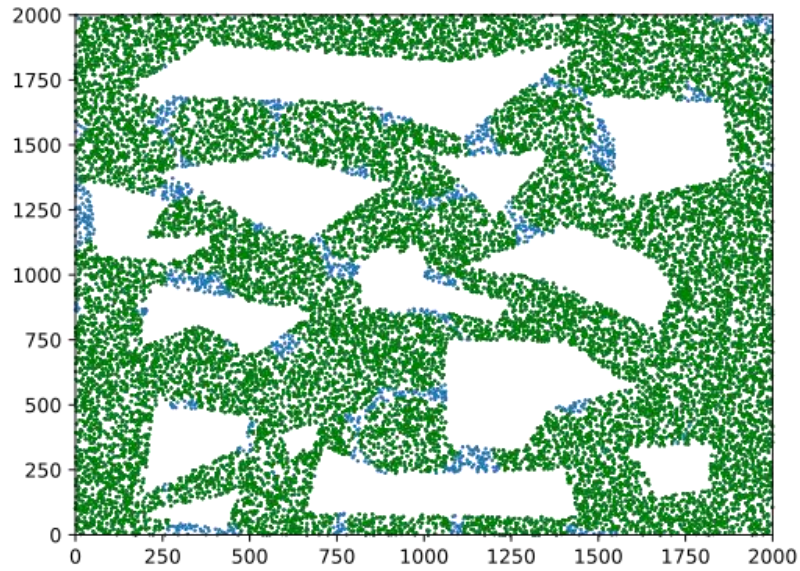
Εικόνα 41: Διάγραμμα Voronoi

- Το διάγραμμα Delaunay



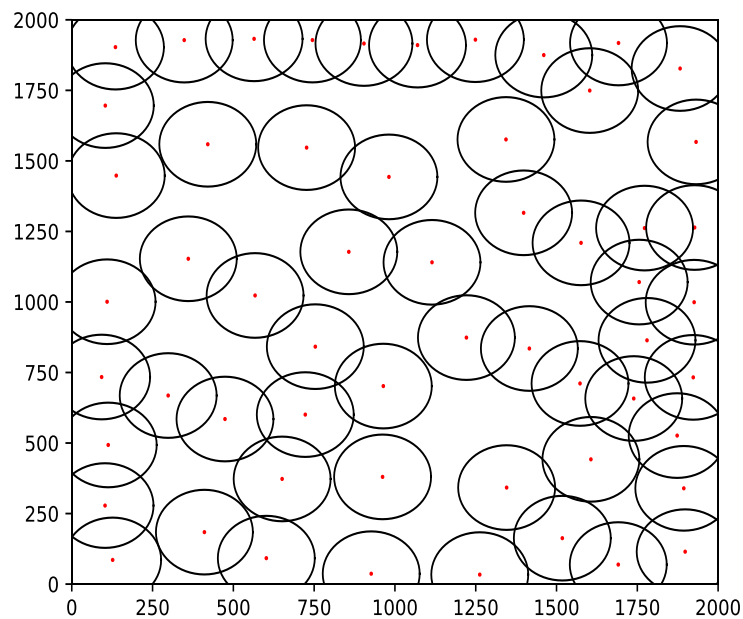
Εικόνα 42: Διάγραμμα Delaunay

- Ένα διάγραμμα που περιλαμβάνει με πράσινο τα σημεία που καλύπτονται από αισθητήρα και με μπλε όσα δεν καλύπτονται.



Εικόνα 43: Διάγραμμα κάλυψης

- Ένα διάγραμμα με τις κυκλικές γεωμετρίες που αντιπροσωπεύουν τις καλύψεις των αισθητήρων.

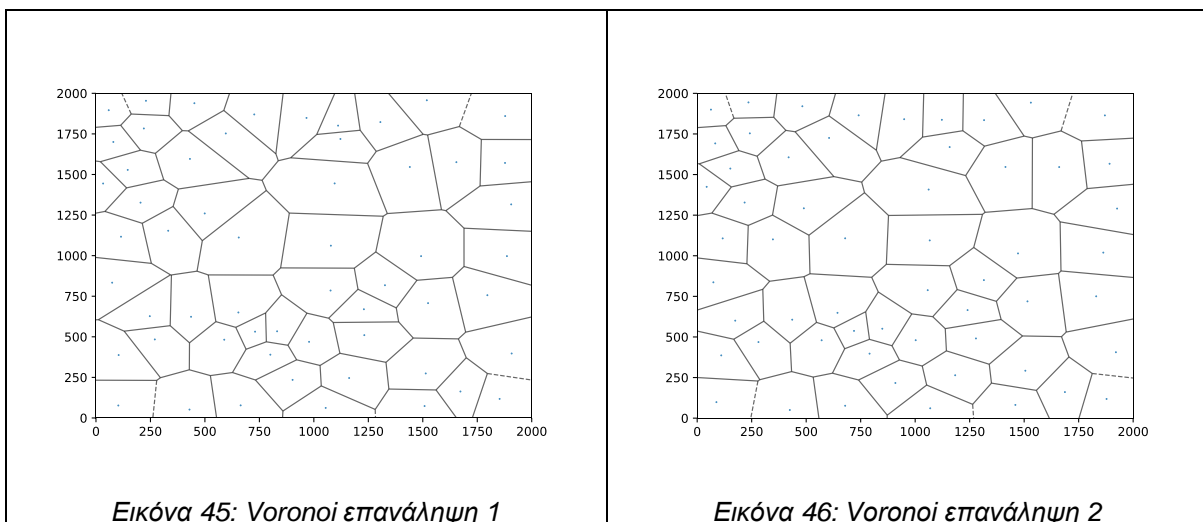


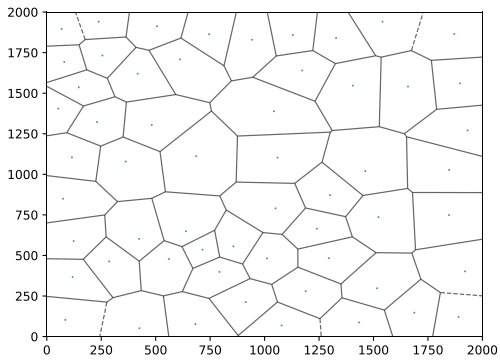
Εικόνα 44: Διάγραμμα αισθητήρων

Επιπλέον στο τέλος της διαδικασίας συνολικά κρατάμε τις εξής πληροφορίες:

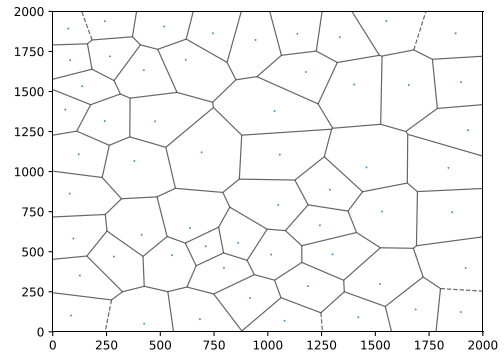
- Το όνομα του σεναρίου τυχαίων αριθμών από το οποίο προέκυψε
- Την ακτίνα των αισθητήρων
- Το επιθυμητό ποσοστό κάλυψης
- Το ελάχιστο πλήθος αισθητήρων που απαιτείται για την κάλυψη του σεναρίου
- Το ποσοστό κάλυψης που επιτεύχθηκε
- Το seed του σεναρίου που είναι αριθμός που όταν τον δίνουμε στην συνάρτηση random της rython παράγει πάντα την ίδια ψευδοτυχαία ακολουθία αριθμών.
- Το χρόνο σε δευτερόλεπτα που έτρεχε το σενάριο σε ένα πυρήνα
- Το συνολικό πλήθος επαναλήψεων μέχρι να τελειώσει η διαδικασία
- Το αν υπολογίζονται οι πραγματικές (εφικτές) θέσεις τοποθέτησης πριν την κάθε επανάληψη και με αυτές να εκτελείται η επόμενη, ή αν οι εφικτές θέσεις προκύπτουν μια φορά μετά την ολοκλήρωση όλων των επαναλήψεων για τον προσδιορισμό των καλύτερων θεωρητικών θέσεων. .

Ενδεικτικά παρατίθενται για το σενάριο FA\_2000\_2000\_50\_4\_10\_150\_real οι αποθηκευμένες εικόνες των πρώτων 10 επαναλήψεων:

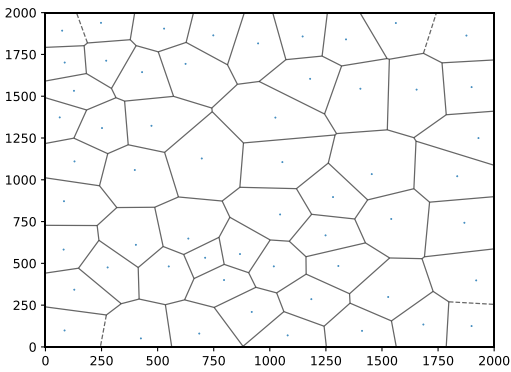




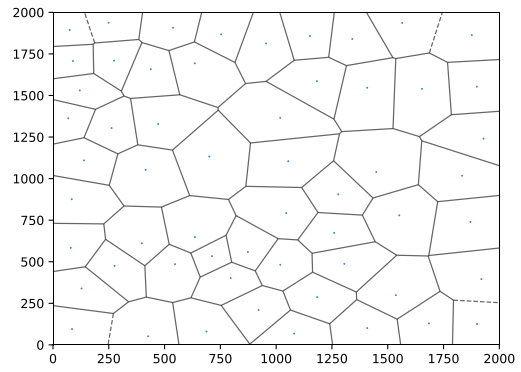
*Εικόνα 47: Voronoι επανάληψη 3*



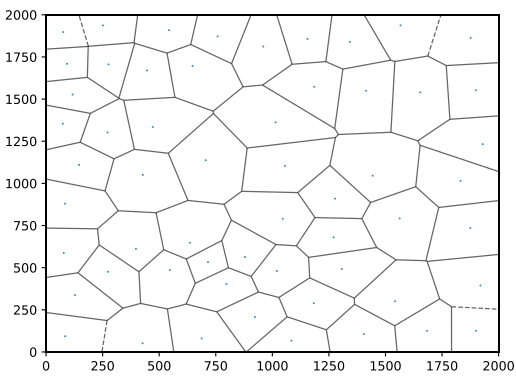
*Εικόνα 48: Voronoι επανάληψη 4*



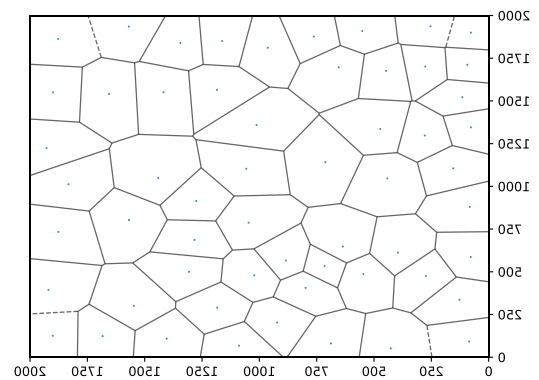
*Εικόνα 49: Voronoι επανάληψη 5*



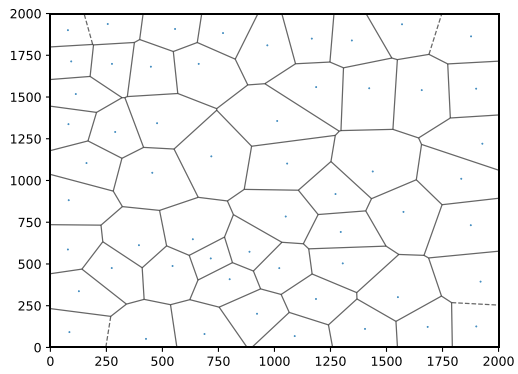
*Εικόνα 50: Voronoι επανάληψη 6*



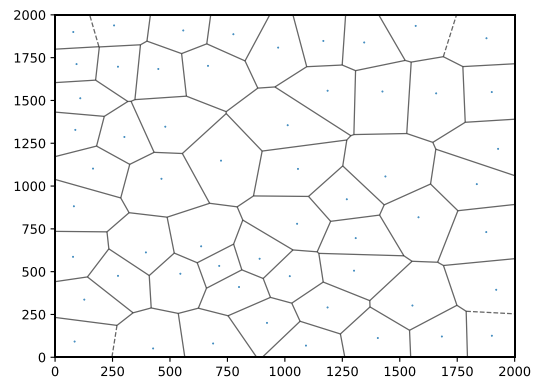
*Εικόνα 51: Voronoι επανάληψη 7*



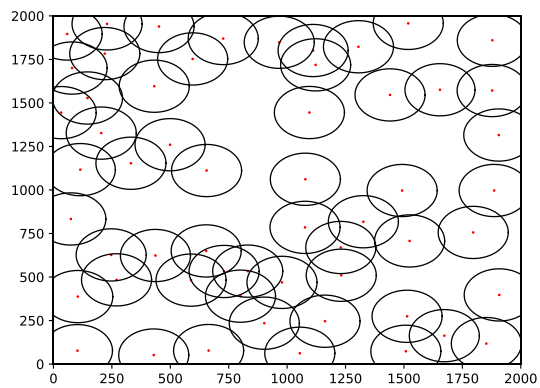
*Εικόνα 52: Voronoι επανάληψη 8*



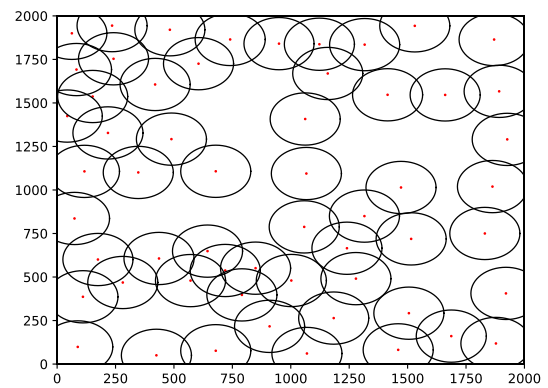
Εικόνα 53: Voronoi επανάληψη 9



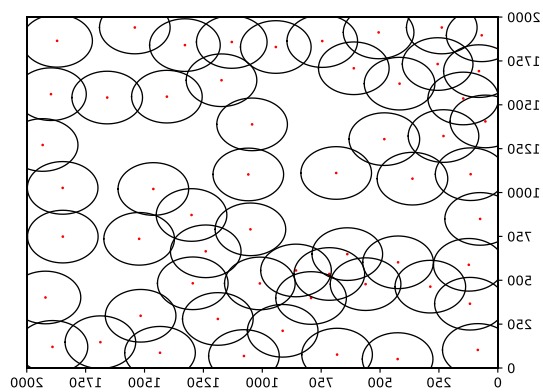
Εικόνα 54: Voronoi επανάληψη 10



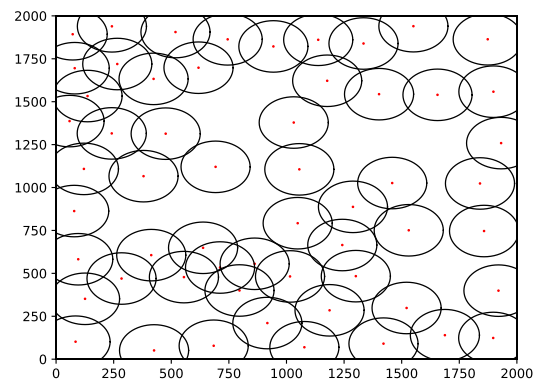
Εικόνα 55: Circles επανάληψη 1



Εικόνα 56: Circles επανάληψη 2

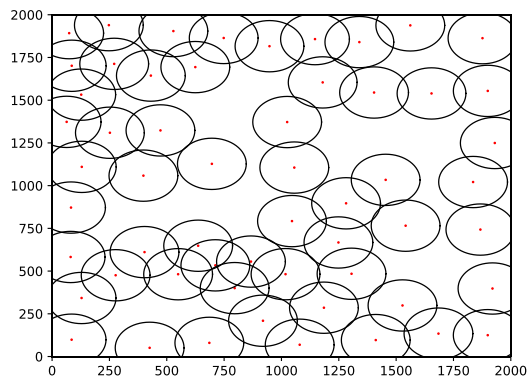


Εικόνα 57: Circles επανάληψη 3

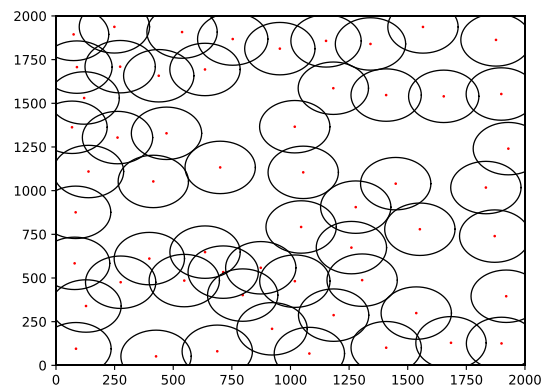


Εικόνα 58: Circles επανάληψη 4

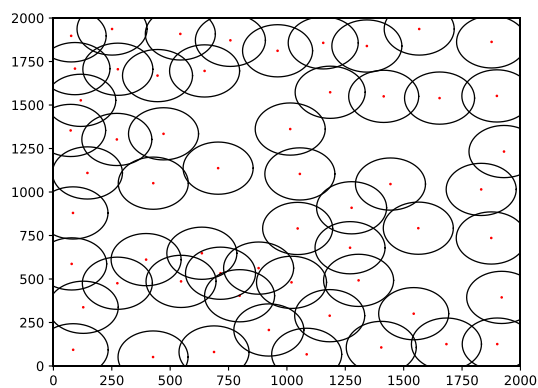




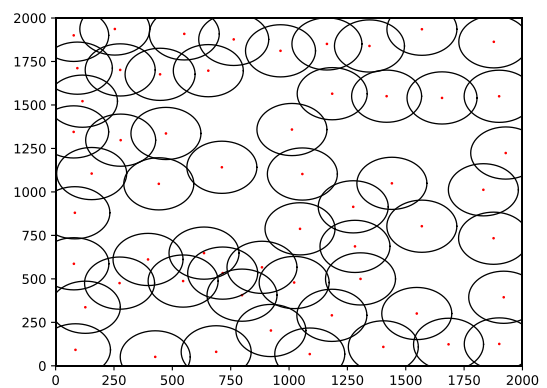
*Εικόνα 59: Circles επανάληψη 5*



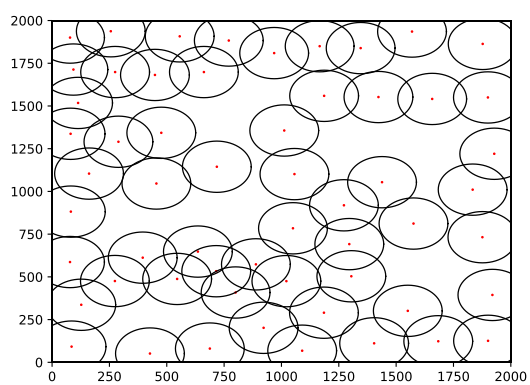
*Εικόνα 60: Circles επανάληψη 6*



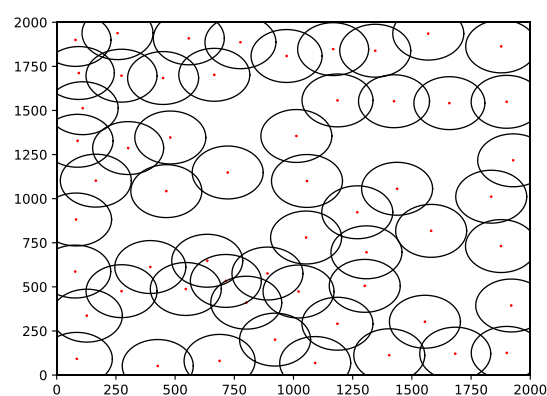
*Εικόνα 61: Circles επανάληψη 7*



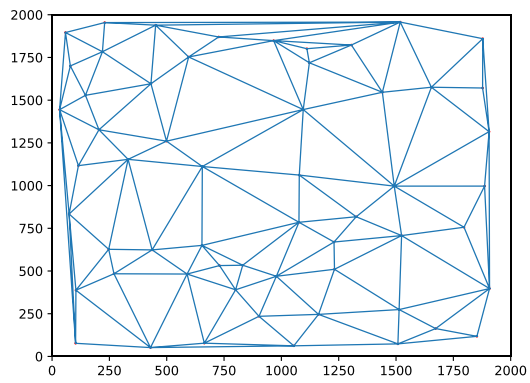
*Εικόνα 62: Circles επανάληψη 8*



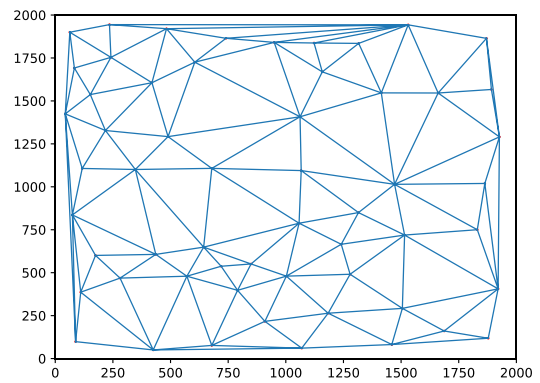
*Εικόνα 63: Circles επανάληψη 9*



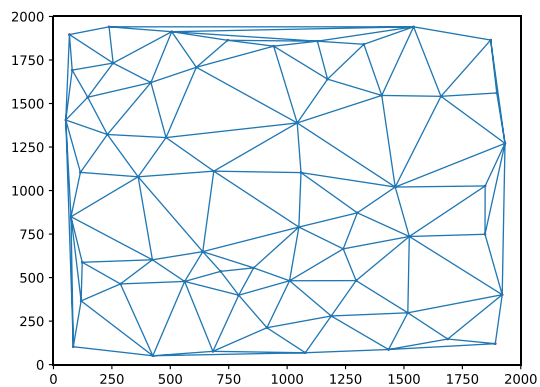
*Εικόνα 64: Circles επανάληψη 10*



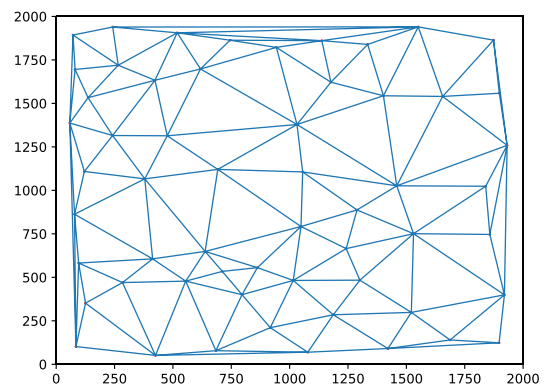
*Εικόνα 65: Delaunay επανάληψη 1*



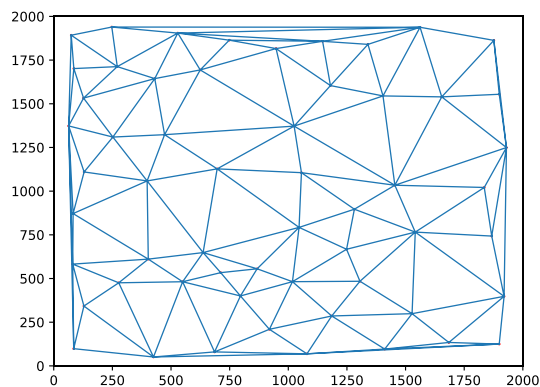
*Εικόνα 66: Delaunay επανάληψη 2*



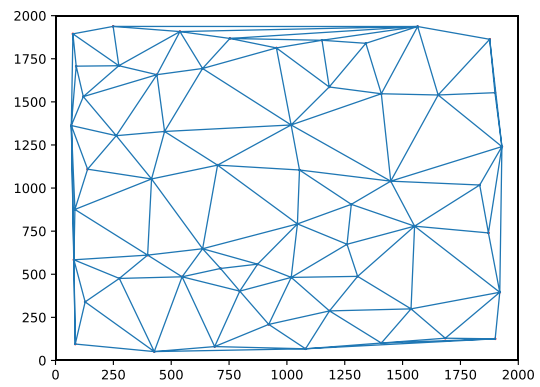
*Εικόνα 67: Delaunay επανάληψη 3*



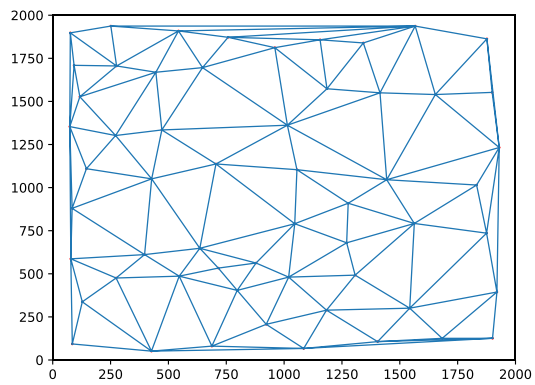
*Εικόνα 68: Delaunay επανάληψη 4*



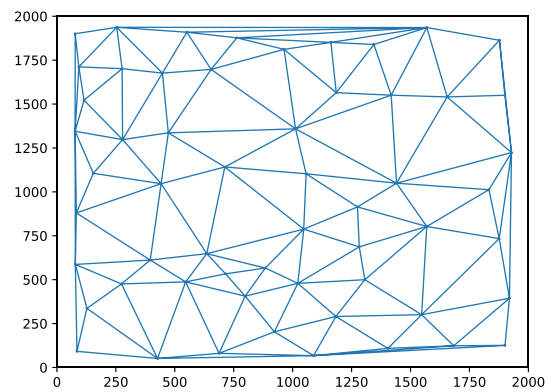
*Εικόνα 69: Delaunay επανάληψη 5*



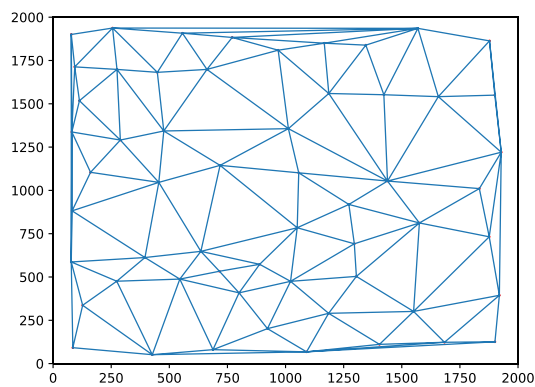
*Εικόνα 70: Delaunay επανάληψη 6*



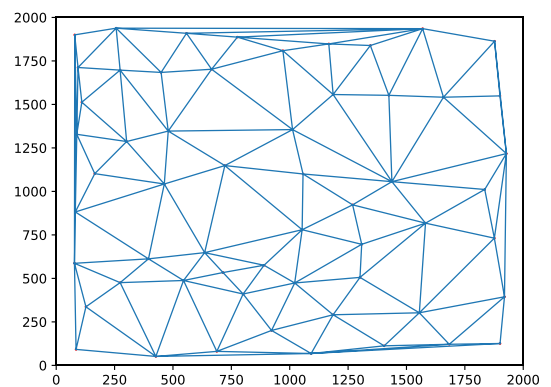
Εικόνα 71: Delaunay επανάληψη 7



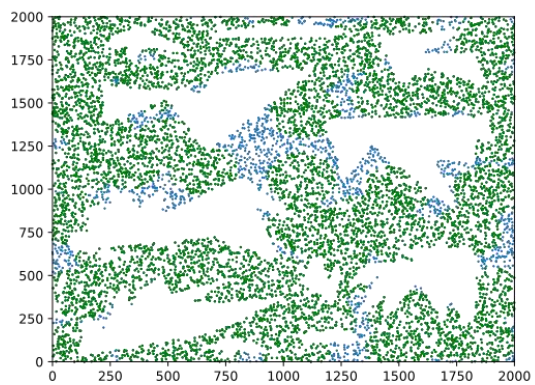
Εικόνα 72: Delaunay επανάληψη 8



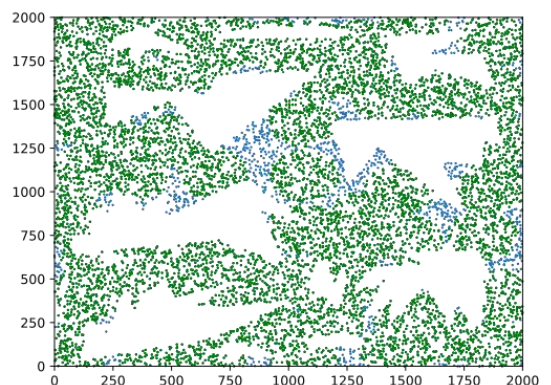
Εικόνα 73: Delaunay επανάληψη 9



Εικόνα 74: Delaunay επανάληψη 10

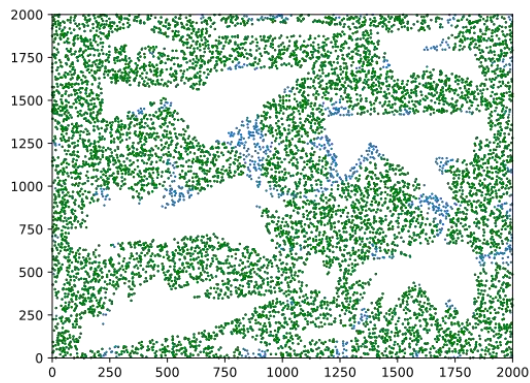


Εικόνα 75: Διάγραμμα κάλυψης επανάληψη 1

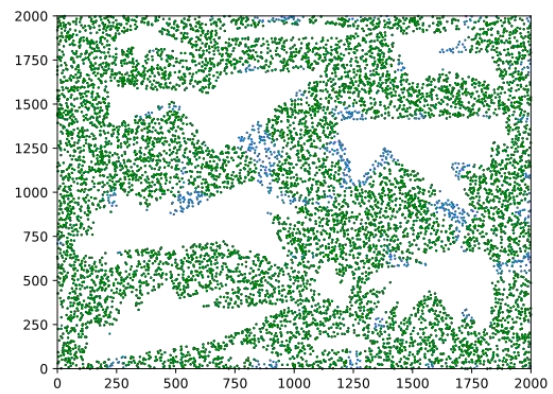


Εικόνα 76: Διάγραμμα κάλυψης επανάληψη 2

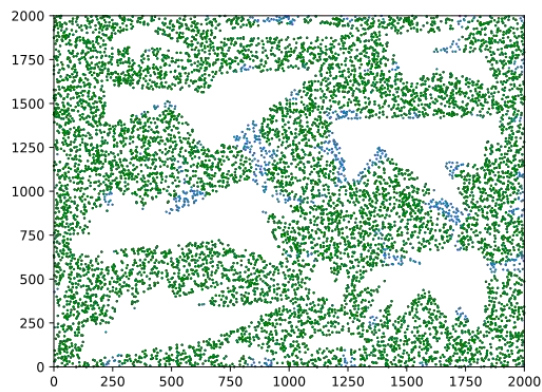




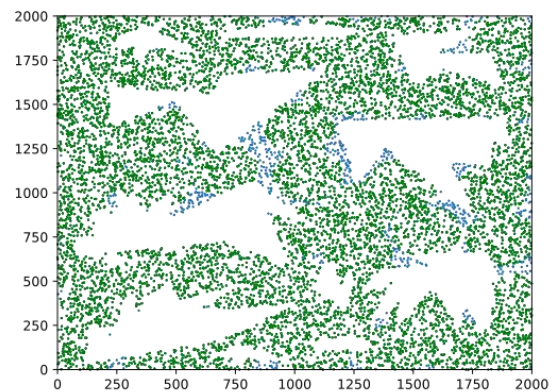
Εικόνα 77: Διάγραμμα κάλυψης επανάληψη 3



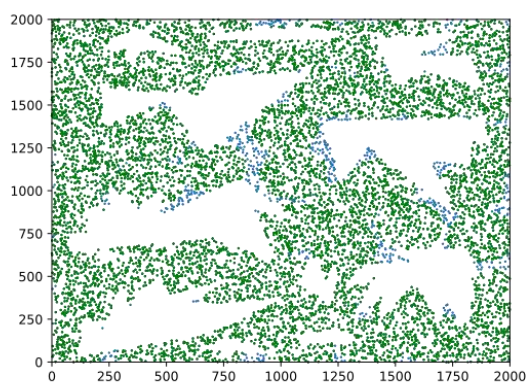
Εικόνα 78: Διάγραμμα κάλυψης επανάληψη 4



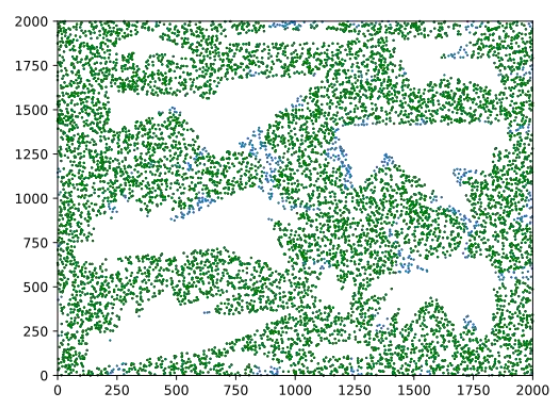
Εικόνα 79: Διάγραμμα κάλυψης επανάληψη 5



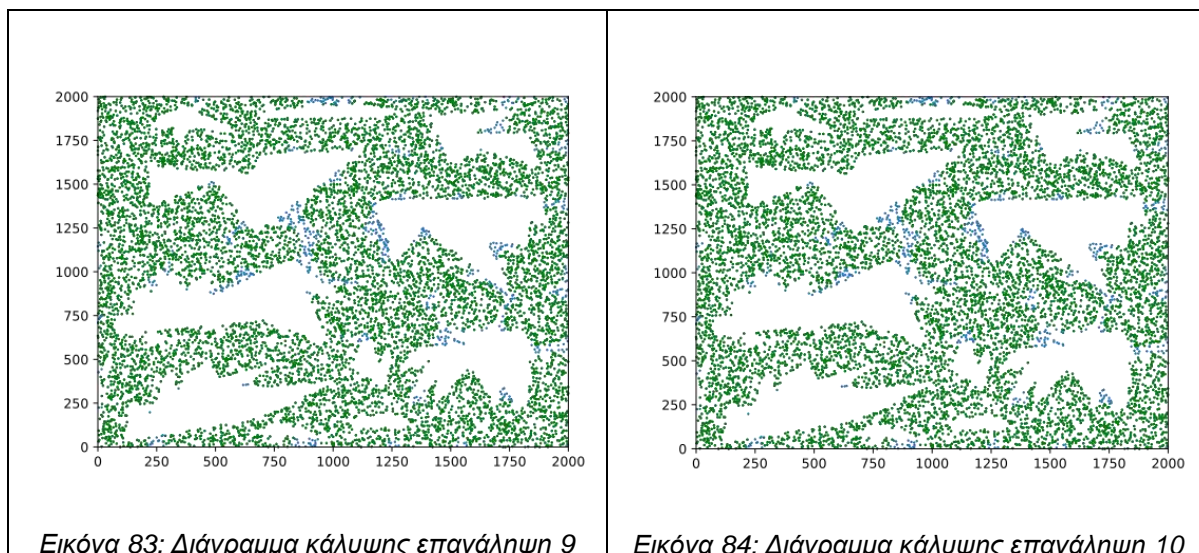
Εικόνα 80: Διάγραμμα κάλυψης επανάληψη 6



Εικόνα 81: Διάγραμμα κάλυψης επανάληψη 7



Εικόνα 82: Διάγραμμα κάλυψης επανάληψη 8



## 4.5 Υπολογιστικό περιβάλλον εκτέλεσης High Performance Computing (HPC)

Οι "Υπερυπολογιστές" είναι υπολογιστικά συστήματα που αξιοποιούνται σε επιστημονικές εφαρμογές οι οποίες απαιτούν την εκτέλεση πολλών εκατομμυρίων μαθηματικών πράξεων ή την επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων. Λόγω αυτών των απαιτήσεων τέτοιου είδους προβλήματα είτε θα χρειαζόνταν απαγορευτικά μεγάλο χρόνο για να ολοκληρωθούν σε έναν απλό υπολογιστή γραφείου είτε λόγω περιορισμένων πόρων (π. χ. κεντρική μνήμη, αποθηκευτικός χώρος) δεν είναι εφικτό να πραγματοποιηθούν καθόλου. Οι υπερυπολογιστές ξεπερνούν τους περιορισμούς αυτούς χρησιμοποιώντας εξειδικευμένο υλικό τελευταίας τεχνολογίας κάθε χρονική στιγμή, εκμεταλλευόμενοι παράλληλα την υπολογιστική ισχύ από πολλαπλές υπολογιστικές μονάδες. Ένας υπερυπολογιστής σήμερα είναι στην πραγματικότητα ένα σύστημα από εκατοντάδες ή και χιλιάδες υπολογιστές (στους οποίους αναφερόμαστε συνήθως ως "κόμβους") που επικοινωνούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας ένα πολύ γρήγορο δίκτυο και οι οποίοι συνεργατικά μπορούν να επιλύουν προβλήματα με μεγάλη ταχύτητα.

Ένας υπερυπολογιστής είναι ένα πανίσχυρο εργαλείο πραγματοποίησης έρευνας. Σήμερα οι υπερυπολογιστές χρησιμοποιούνται για να επιλύσουν μερικά από τα σημαντικότερα προβλήματα της ανθρωπότητας, όπως η πρόελευση του σύμπαντος, η ανακάλυψη νέων φαρμάκων, οι έρευνες για την κλιματική αλλαγή και πολλά άλλα.

[\[https://hpc.grnet.gr/supercomputer/#supercomputer\]](https://hpc.grnet.gr/supercomputer/#supercomputer).

### 4.5.1 Το περιβάλλον HPC "Aris"

Το **ARIS (Advanced Research Information System)** είναι το ισχυρότερο υπολογιστικό σύστημα στην Ελλάδα για επιστημονικές εφαρμογές. Τέθηκε σε λειτουργία τον Ιούλιο του 2015 από την ΕΔΕΤ Α. Ε. προσφέροντας ένα ισχυρό εργαλείο έρευνας στην Ελληνική επιστημονική κοινότητα. Το σύστημα κατά την έναρξη λειτουργίας του

συμπεριλήφθηκε στη λίστα με τους 500 ισχυρότερους υπολογιστές του κόσμου (top500.org) και έβαλε την Ελλάδα στο παγκόσμιο χάρτη των συστημάτων υψηλών επιδόσεων. Το υπολογιστικό σύστημα ARIS σήμερα έχει μέγιστη θεωρητική υπολογιστική ισχύ 444 TFlop/s (μπορεί δηλαδή να εκτελεί 444 τρισεκατομμύρια μαθηματικές πράξεις το δευτερόλεπτο) και προσφέρει πολλαπλές δυνατότητες επεξεργασίας δεδομένων.

Ο ARIS συνδυάζει 4 διαφορετικές αρχιτεκτονικές διαμοιρασμένες σε αντίστοιχες "νησίδες κόμβων"

Αναλυτικά, η υποδομή αποτελείται από:

- Μία νησίδα η οποία διαθέτει 426 υπολογιστικούς κόμβους (**thin nodes**). Κάθε κόμβος διαθέτει δύο επεξεργαστές και κάθε επεξεργαστής περιέχει 10 επεξεργαστικούς πυρήνες προσφέροντας έτσι συνολικά 8.520 πυρήνες (CPU cores). Οι κόμβοι αυτοί είναι κατάλληλοι για εφαρμογές υψηλής παραλληλίας που μπορούν να σπάσουν τα δεδομένα τους σε πολλά μικρά κομμάτια πριν τα επεξεργαστούν.
- Μια νησίδα κόμβων μεγάλης μνήμης (**fat nodes**) που αποτελείται από 44 κόμβους. Κάθε κόμβος προσφέρει 4 επεξεργαστές, 40 πυρήνες και 512 GB κεντρικής μνήμης ανά κόμβο. Οι κόμβοι αυτοί είναι κατάλληλοι για εφαρμογές που χρειάζονται πολύ μεγάλη κεντρική μνήμη και όχι τόσο για υψηλή κλιμάκωση.
- Μια νησίδα κόμβων επιταχυντών GPU (**gpu nodes**) που αποτελείται από 44 κόμβους. Κάθε κόμβος περιέχει 2 επεξεργαστές με 10 πυρήνες ανά επεξεργαστή, 64 GB μνήμης και 2 κάρτες γραφικών GPU Nvidia K40. Οι κόμβοι αυτοί είναι κατάλληλοι για εφαρμογές που υλοποιούν υπολογιστικές πράξεις που μπορούν να αξιοποιήσουν τις κάρτες γραφικών ως συνεπεξεργαστές για επιτάχυνση των υπολογισμών.
- Μια νησίδα κόμβων επιταχυντών Xeon Phi (**phi nodes**) που αποτελείται από 18 κόμβους, καθένας εκ των οποίων περιέχει 2 επεξεργαστές με 10 πυρήνες, 64 GB μνήμης και 2 συνεπεξεργαστές Intel Xeon Phi 7120P. Είναι κατάλληλη για παράλληλες εφαρμογές που αξιοποιούν την τεχνολογία συνεπεξεργαστών της Intel Xeon Phi.

[\[https://hpc.grnet.gr/supercomputer/#aris\].σ](https://hpc.grnet.gr/supercomputer/#aris)

#### 4.5.2 Απαιτήσεις και σχεδίαση εκτέλεσης: το περιβάλλον HPC "Aris"

Η εκτέλεση του τροποποιημένου λογισμικού OptEval αποτελεί μια πολύ χρονοβόρα διαδικασία, ιδιαίτερα για σενάρια με μεγάλο πλήθος τυχαίων σημείων. Στην αρχή για την εκτέλεση των σεναρίων χωροθέτησης έγινε προσπάθεια να τρέξουν σε ένα τετραπύρνηνο server, γρήγορα όμως έγινε αντιληπτό πως δεν θα τερμάτιζαν σε λιγότερο από 3 μήνες, χρόνο τον οποίο δεν άξιζε το ρίσκο σε περίπτωση λάθους. Έγινε λοιπόν στροφή στο υπολογιστικό σύστημα Aris.

Κατόπιν αιτήσεως να λάβουμε πόρους του υπερυπολογιστή μας δόθηκε πρόσβαση στο fat node island που διαθέτει το υπολογιστικό σύστημα. Μας διέθεσαν 800 cores για 50.000 ώρες κάτι που βοήθησε αισθητά στην παραλληλοποίηση του προβλήματος, καθώς ζητούμενο είναι η πολλαπλή εκτέλεση του ίδιου αλγορίθμου με διαφορετικές παραμέτρους

εισόδου. Κάθε εκτέλεση καταλαμβάνει ένα core. Συνεπώς η αύξηση της ταχύτητας ήταν αισθητή.

Για τα σενάρια εκτέλεσης επιλέχθηκε για κάθε σενάριο τυχαίων σημείων να διατηρηθεί το απαιτούμενο ποσοστό κάλυψης στο 90%, το μέγιστο πλήθος επαναλήψεων σε περίπτωση που δεν συγκλίνει η Hausdorff να είναι 50, οι τιμές που μπορεί να πάρει το εύρος της ακτίνας να είναι [ 150, 200, 250 ]. Επίσης σε κάθε σενάριο εκτέλεσης γίνεται επιλογή για το αν θα υπολογίζονται οι πραγματικές (εφικτές) θέσεις τοποθέτησης πριν την κάθε επανάληψη και με αυτές να εκτελείται η επόμενη, αντί οι εφικτές θέσεις να προκύπτουν μια φορά μετά την ολοκλήρωση όλων των επαναλήψεων για τον προσδιορισμό των καλύτερων πραγματικών θέσεων εγκατάστασης των αισθητήρων.

Το πλήθος των σεναρίων εκτέλεσης λαμβάνοντας υπόψη πως έχουμε 384 σενάρια τυχαίων σημείων καθώς και πως για κάθε τέτοιο σενάριο χρειάζονται 6 εκτελέσεις του λογισμικού OptEval, έχουμε συνολικά 2304 σενάρια κάτι που δικαιολογεί την επιλογή χρήσης του συστήματος Aris.

#### 4.5.3 Οι πόροι που χρησιμοποιήθηκαν στις εκτελέσεις

Στο υπολογιστικό σύστημα Aris μιας διατέθηκαν 50000 core hours στο fat node island για χρονικό διάστημα 2 μηνών. Από αυτούς τους πόρους χρησιμοποιήθηκαν 15.500 ώρες για την δημιουργία των τυχαίων σημείων μαζί με τις μετρικές πάνω σε αυτά. Για τις εκτελέσεις του Opteval χρησιμοποιήθηκαν 7600 ώρες. Κατά την διαδικασία παραγωγής και ελέγχου δαπανήθηκαν 1000 ώρες. Στο σύνολο τα αποθηκευμένα δεδομένα είναι 1TB.

#### 4.5.4 Τεχνικά στοιχεία εκτέλεσης

Για το τρέξιμο μια εφαρμογής στο σύστημα Aris, πόροι του συστήματος πρέπει να δεσμευτούν. Ο Aris χρησιμοποιεί το SLURM Workload Manger( Simple Linux Utility for Resource Management) για την διανομή φορτίων στον υπερυπολογιστή.

Το slurm διαθέτει τρεις βασικές λειτουργίες. Πρώτον διαθέτει αποκλειστική ή μη πρόσβαση στους πόρους( υπολογιστικούς κόμβους) στους χρήστες για κάποιο χρονικό διάστημα, ώστε να μπορούν να εκτελέσουν εργασία. Δεύτερον, παρέχει ένα πλαίσιο για την εκκίνηση, εκτέλεση και παρακολούθηση εργασιών ( συνήθως μια παράλληλη εργασία ) στο σύνολο των κατανεμημένων κόμβων. Τέλος αμφισβητεί ισχυρισμούς για χρήστες που αιτούνται πόρους που δεν διαθέτει το σύστημα, διαχειρίζοντας μια ουρά εκκρεμούς εργασίας.

Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν όλοι οι υπολογιστικοί κόμβοι του συστήματος αποτελεσματικά και με τρόπο δίκαιου μεριδίου, οι πόροι διανέμονται σε ουρές( partitions). Οι ουρές αυτές ομαδοποιούν τους πόρους του συστήματος σε σύνολα κάθε ένα από τα οποία διαθέτει μια ποικιλία περιορισμών, όπως όριο μεγέθους εργασίας, χρήστες που επιτρέπονται να το χρησιμοποιούν κ.λπ. Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση της ουράς taskp η οποία είναι σχεδιασμένη για να τρέχει πολλαπλές σειριακές δουλειές.



Για την δέσμευση πόρων και την εκτέλεση εφαρμογών, πρέπει να υποβληθεί στο σύστημα ένα batch script. Το συγκεκριμένο script, πρέπει να καταγράφει της προδιαγραφές της προς εκτέλεση εφαρμογής. Πιο συγκεκριμένα πρέπει να καταγράφει:

- Την ουρά του συστήματος στην οποία θα εκτελεστεί
- Το πλήθος των υπολογιστικών κόμβων που χρειάζεται
- Το πλήθος των πυρήνων σε κάθε υπολογιστικό κόμβο που χρειάζονται
- Το χρονικό όριο, μετά το οποίο θα σκοτώνεται η εφαρμογή.

Στην παρούσα εργασία για την δημιουργία σεναρίων τυχαίων σημείων χρησιμοποιήσαμε scripts αυτής της μορφής.

```
1 ▾ #!/bin/bash
2 #SBATCH --job-name=run10_4 # Job name
3 #SBATCH --ntasks=2 # Number of tasks
4 #SBATCH --time=100:10:00 # Run time (hh:mm:ss) - 1.5 hours
5 #SBATCH --account=pa190601
6 #SBATCH --partition=taskp
7 #SBATCH --cpus-per-task=70
8
9 module load python #load any needed modules
10
11
12
13
14 array=( 4 6 8 10 )
15 for i in "${array[@]}"
16 do
17 python3 create_scenario.py --openArea 0 --coveredArea 400000 --MaxP 400000 --Div $i --n $((400000/i)) --m 1 --file cover0.txt &
18 python3 create_scenario.py --openArea 0 --coveredArea 400000 --MaxP 100000 --Div $i --n $((100000/i)) --m 2 --file cover0.txt &
19 python3 create_scenario.py --openArea 0 --coveredArea 400000 --MaxP 444400 --Div $i --n $((444400/i)) --m 3 --file cover0.txt &
20 python3 create_scenario.py --openArea 0 --coveredArea 400000 --MaxP 250000 --Div $i --n $((250000/i)) --m 4 --file cover0.txt &
21 python3 create_scenario.py --openArea 0 --coveredArea 400000 --MaxP 160000 --Div $i --n $((160000/i)) --m 5 --file cover0.txt &
22 python3 create_scenario.py --openArea 0 --coveredArea 400000 --MaxP 40000 --Div $i --n $((40000/i)) --m 10 --file cover0.txt &
23 python3 create_scenario.py --openArea 0 --coveredArea 400000 --MaxP 17700 --Div $i --n $((17700/i)) --m 15 --file cover0.txt &
24 python3 create_scenario.py --openArea 0 --coveredArea 400000 --MaxP 10000 --Div $i --n $((10000/i)) --m 20 --file cover0.txt &
25 python3 create_scenario.py --openArea 0 --coveredArea 400000 --MaxP 4400 --Div $i --n $((4400/i)) --m 30 --file cover0.txt &
26 python3 create_scenario.py --openArea 0 --coveredArea 400000 --MaxP 2500 --Div $i --n $((2500/i)) --m 40 --file cover0.txt &
27 python3 create_scenario.py --openArea 0 --coveredArea 400000 --MaxP 1600 --Div $i --n $((1600/i)) --m 50 --file cover0.txt &
28 python3 create_scenario.py --openArea 0 --coveredArea 400000 --MaxP 1100 --Div $i --n $((1100/i)) --m 60 --file cover0.txt &
29 python3 create_scenario.py --openArea 0 --coveredArea 400000 --MaxP 800 --Div $i --n $((800/i)) --m 70 --file cover0.txt &
30 python3 create_scenario.py --openArea 0 --coveredArea 400000 --MaxP 600 --Div $i --n $((600/i)) --m 80 --file cover0.txt &
31 python3 create_scenario.py --openArea 0 --coveredArea 400000 --MaxP 400 --Div $i --n $((400/i)) --m 90 --file cover0.txt &
32 python3 create_scenario.py --openArea 0 --coveredArea 400000 --MaxP 400 --Div $i --n $((400/i)) --m 100 --file cover0.txt &
33 done
```

Εικόνα 85: Bash script παραγωγής τυχαίων σημείων

Επίσης τα script για την εκτέλεση του λογισμικού OptEval είναι της μορφής :



```

1 ▾ #!/bin/bash
2 #SBATCH --job-name=re20_4 # Job name
3 #SBATCH --ntasks=60 # Number of tasks
4 #SBATCH --time=150:10:00 # Run time (hh:mm:ss) - 1.5 hours
5 #SBATCH --account=pa190601
6 #SBATCH --partition=taskp
7 #SBATCH --cpus-per-task=1
8 module load python #load any needed modules
9 array=( $( ls . | grep txt ) )
10 array2=(150 200 250)
11 for i in "${array[@]}"
12 do
13     echo $i
14     for j in "${array2[@]}"
15     do
16         namedir=${i//.txt}_${j}
17         mkdir ${namedir}
18         cd ${namedir}
19         theordir=${namedir}_theor
20         mkdir ${theordir}
21         cd ${theordir}
22         cp ../../${i} ./
23         python ../../../../OptEval.py --theor --r_sensor $j --n_sensor 0 --epanalipseis 50 --plot --c_target 0.9 --file ${i} &
24         cd ../
25         realdir=${namedir}_real
26         mkdir ${realdir}
27         cd ${realdir}
28         cp ../../${i} ./
29         python ../../../../OptEval.py --r_sensor $j --n_sensor 0 --epanalipseis 50 --plot --c_target 0.9 --file ${i} &
30         cd ../
31         cd ../
32         echo $namedir
33     done
34 done

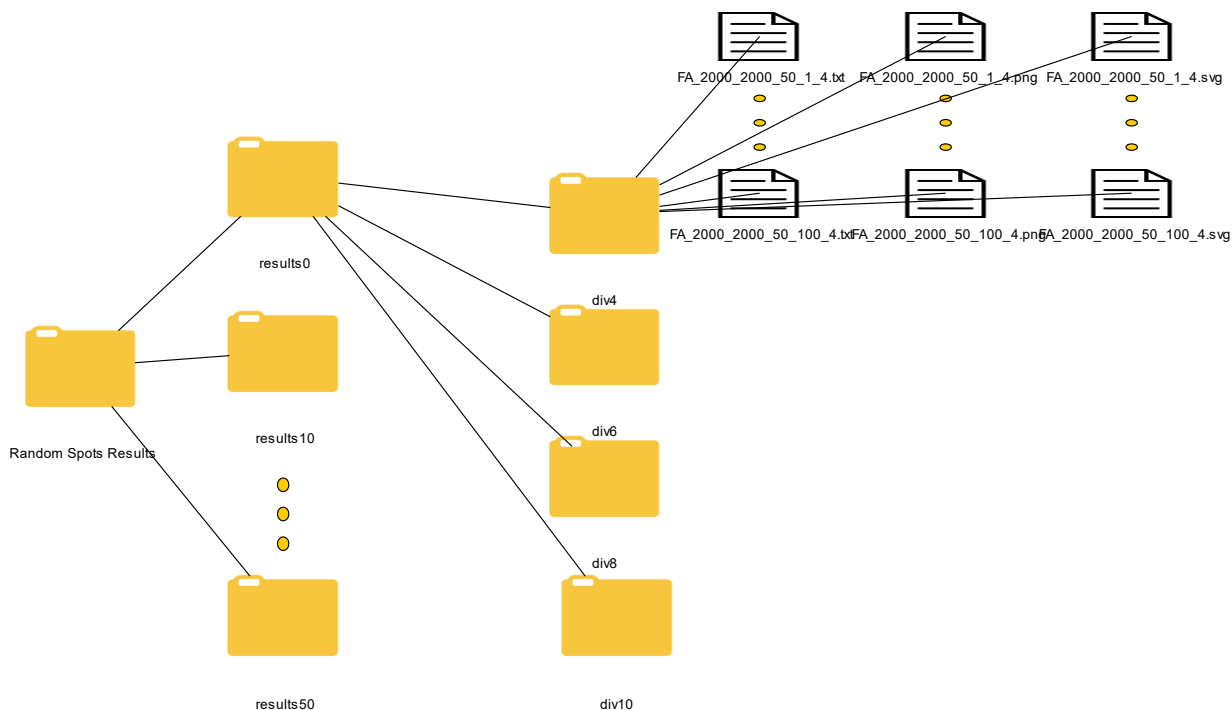
```

Εικόνα 86: Bash script εκτέλεσης λογισμικού OptEval

#### 4.5.5 Αποτελέσματα

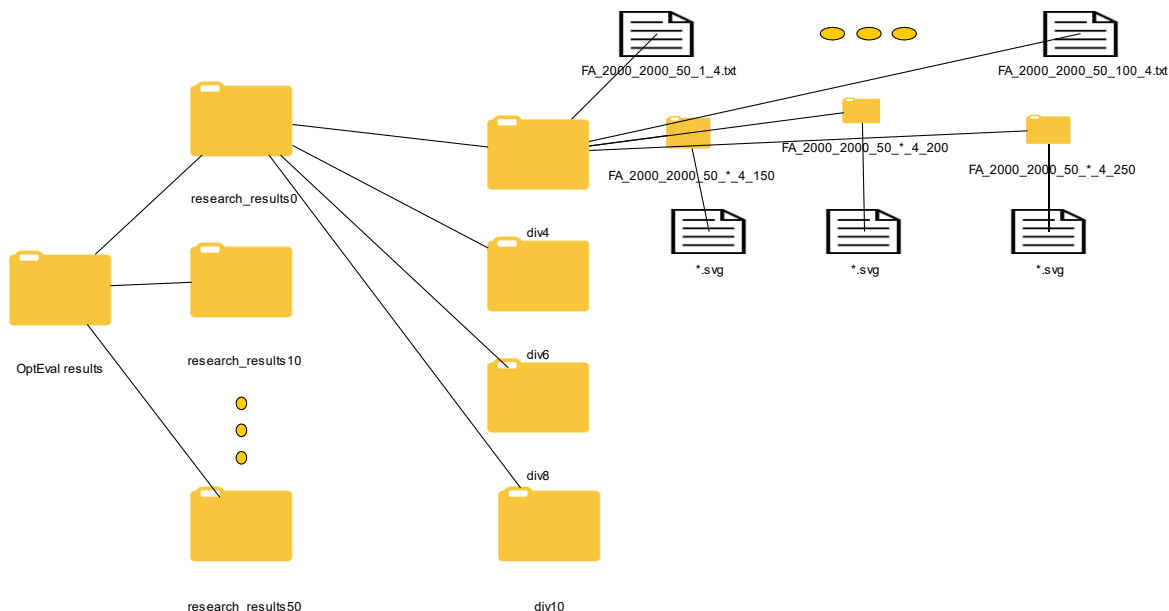
Πολύ σημαντικό κομμάτι για την προσπέλαση των δεδομένων με τα αρχεία που αφορούν τα τυχαία σημεία αλλά και τα αποτελέσματα των εκτελέσεων του τροποποιημένου λογισμικού OptEval, αποτελεί η κατανόηση της δομής των φακέλων που περιέχουν τα αρχεία καθώς και η επεξήγηση της ονοματολογίας αυτών των αρχείων.

Ξεκινώντας από την δομή του φακέλου που περιέχει τα τυχαία σενάρια γίνεται αντιληπτό πως αποτελείται από 5 φακέλους με τα ονόματα results0, results10, results20, results30, results40, results50. Κάθε φάκελος από αυτούς περιέχει μέσα 4 φακέλους με τα ονόματα div4, div6, div8, div10 καθώς και ένα αρχείο με το όνομα coverX( το X είναι 0 για το results0,10 για το results 10 και ούτω κάθε εξής). Κάθε φάκελος από αυτούς περιέχει 16 σενάρια τυχαίων σημείων μαζί με αρχεία με μετρικές για το καθένα καθώς και δύο οπτικοποιήσεις τους σε png και svg. Τα ονόματα των αρχείων υποδεικνύουν και τις παραμέτρους δημιουργίας τους, όπως έχουν αναλυθεί σε προηγούμενη ενότητα. Η δομή μοιάζει ως εξής :



Εικόνα 87: Random spots results structure

Εστιάζοντας στις εκτελέσεις του λογισμικού OptEval ο φάκελος με τα αποτελέσματα αποτελείται από 5 φακέλους με τα ονόματα results0\_research, results10\_research, results20\_research, results30\_research, results40\_research, results50\_research. Κάθε φάκελος από αυτούς περιέχει μέσα 4 φακέλους με τα ονόματα div4, div6, div8, div10. Κάθε φάκελος από αυτούς περιέχει 16 αρχεία με τυχαία σημεία τα οποία ακολουθούν την λογική της προηγούμενης παραγράφου. Για κάθε αρχείο από αυτά υπάρχουν 3 φάκελοι με το ίδιο όνομα και τις επεκτάσεις \_150, \_200, \_250 ( αναφέρονται στην ακτίνα του αισθητήρα ). Σε κάθε φάκελο από αυτούς υπάρχουν δύο φάκελοι μέσα, με όνομα ίδιο με αυτό του φακέλου και τις επεκτάσεις \_real, \_theor ( αναφέρονται σε εκτελέσεις του αλγορίθμου με Hausdorff πάνω στις πραγματικές θέσεις ή πάνω στις θεωρητικές θέσεις). Μέσα σε αυτούς τους φακέλους βρίσκονται όλα τα svg που παράγει η συγκεκριμένη εκτέλεση του λογισμικού, αρχείο με τα αποτελέσματα και ένα αρχείο με τα αντίστοιχα τυχαία σημεία που χρησιμοποιήθηκαν στην εκτέλεση του OptEval. Η δομή μοιάζει ως εξής :



Εικόνα 88: : OptEval executions results structure

Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης, μόνο για παράμετρο R=250, φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί. Για λόγους οικονομίας χώρου παραλείπονται τα αποτελέσματα των εκτελέσεων, με ακτίνες 150, 200 και 250 και με τους 2 τρόπους υπολογισμού των θέσεων της επόμενης επανάληψης (θεωρητική ή υπαρκτή θέση). Σε github private repository είναι διαθέσιμο το σύνολο των αποτελεσμάτων των 2384 συνολικά τρεξιμάτων του αλγορίθμου.

Scenario ID	min D	Scenario sensors	Sensor range	Theoretical min N of sensors	Final calculated N of sensors	Difference %	Achieved coverage ratio	Algorithm exec time (sec)	N of iterations
FA_2000_2000_0_1_4	1	1.000.000	250	21	21		1,01	111.593,21	50
FA_2000_2000_0_2_4	2	250.000	250	21	21		1,01	24.535,64	50
FA_2000_2000_0_3_4	3	111.100	250	21	21		1,01	11.158,25	50
FA_2000_2000_0_4_4	4	62.500	250	21	21		1,01	6.408,56	50
FA_2000_2000_0_5_4	5	40.000	250	21	21		1,01	3.719,43	43
FA_2000_2000_0_10_4	10	10.000	250	21	22	4,76	1,03	1.380,59	58
FA_2000_2000_0_15_4	15	4.425	250	21	21		1,01	321,96	21
FA_2000_2000_0_20_4	20	2.500	250	21	21		1,01	347,83	31
FA_2000_2000_0_30_4	30	1.100	250	21	21		1,02	106,08	15
FA_2000_2000_0_40_4	40	625	250	21	23	9,52	1,02	133,23	29
FA_2000_2000_0_50_4	50	400	250	20	22	10,00	1,00	94,46	27
FA_2000_2000_0_60_4	60	275	250	20	23	15,00	1,01	100,11	30
FA_2000_2000_0_70_4	70	200	250	20	23	15,00	1,03	84,68	28
FA_2000_2000_0_80_4	80	150	250	19	21	10,53	1,01	59,47	23
FA_2000_2000_0_90_4	90	100	250	19	21	10,53	1,00	46,44	15
FA_2000_2000_0_100_4	100	100	250	19	20	5,26	1,00	25,96	8
FA_2000_2000_0_1_6	1	666.666	250	21	21		1,02	73.177,21	50
FA_2000_2000_0_2_6	2	166.666	250	21	21		1,01	23.758,90	50
FA_2000_2000_0_3_6	3	74.066	250	21	21		1,02	9.692,61	27
FA_2000_2000_0_4_6	4	41.666	250	21	21		1,02	9.534,99	50
FA_2000_2000_0_5_6	5	26.666	250	21	21		1,02	5.967,66	41
FA_2000_2000_0_10_6	10	6.666	250	21	21		1,01	946,79	17

Scenario ID	min D	Scenario sensors	Sensor range	Theoretical min N of sensors	Final calculated N of sensors	Difference %	Achieved coverage ratio	Algorithm exec time (sec)	N of iterations
FA_2000_2000_0_15_6	15	2.950	250	21	22	4,76	1,02	939,56	34
FA_2000_2000_0_20_6	20	1.666	250	21	21		1,02	463,53	25
FA_2000_2000_0_30_6	30	733	250	20	20		1,01	204,80	15
FA_2000_2000_0_40_6	40	416	250	20	20		1,01	142,56	12
FA_2000_2000_0_50_6	50	266	250	20	23	15,00	1,04	237,98	30
FA_2000_2000_0_60_6	60	183	250	20	23	15,00	1,03	206,74	27
FA_2000_2000_0_70_6	70	133	250	19	19		1,03	45,05	5
FA_2000_2000_0_80_6	80	100	250	19	21	10,53	1,03	110,47	15
FA_2000_2000_0_90_6	90	66	250	17	19	11,76	1,04	93,62	13
FA_2000_2000_0_100_6	100	66	250	18	19	5,56	1,01	81,11	10
FA_2000_2000_0_1_8	1	500.000	250	21	21		1,01	55.495,25	50
FA_2000_2000_0_2_8	2	125.000	250	21	21		1,02	20.593,40	50
FA_2000_2000_0_3_8	3	55.550	250	21	21		1,02	11.985,83	50
FA_2000_2000_0_4_8	4	31.250	250	21	21		1,02	7.617,54	50
FA_2000_2000_0_5_8	5	20.000	250	21	21		1,00	5.432,81	50
FA_2000_2000_0_10_8	10	5.000	250	21	22	4,76	1,04	1.915,26	50
FA_2000_2000_0_15_8	15	2.212	250	21	21		1,02	459,52	18
FA_2000_2000_0_20_8	20	1.250	250	21	21		1,00	270,92	15
FA_2000_2000_0_30_8	30	550	250	20	22	10,00	1,01	414,40	44
FA_2000_2000_0_40_8	40	312	250	20	20		1,02	110,84	10
FA_2000_2000_0_50_8	50	200	250	20	21	5,00	1,03	128,27	15
FA_2000_2000_0_60_8	60	137	250	20	20		1,01	44,24	4
FA_2000_2000_0_70_8	70	100	250	19	23	21,05	1,02	181,90	25
FA_2000_2000_0_80_8	80	75	250	18	22	22,22	1,01	145,25	21
FA_2000_2000_0_90_8	90	50	250	18	18		1,00	39,43	4
FA_2000_2000_0_100_8	100	50	250	16	18	12,50	1,04	99,02	13
FA_2000_2000_0_1_10	1	400.000	250	21	21		1,01	44.577,00	48
FA_2000_2000_0_2_10	2	100.000	250	21	21		1,01	16.708,47	50
FA_2000_2000_0_3_10	3	44.440	250	21	21		1,01	10.027,50	50
FA_2000_2000_0_4_10	4	25.000	250	21	21		1,01	5.957,26	44
FA_2000_2000_0_5_10	5	16.000	250	21	21		1,01	3.423,07	34
FA_2000_2000_0_10_10	10	4.000	250	21	21		1,01	1.163,74	33
FA_2000_2000_0_15_10	15	1.770	250	21	21		1,01	593,46	29
FA_2000_2000_0_20_10	20	1.000	250	21	22	4,76	1,01	330,69	21
FA_2000_2000_0_30_10	30	440	250	20	21	5,00	1,02	255,82	27
FA_2000_2000_0_40_10	40	250	250	20	22	10,00	1,01	197,67	24
FA_2000_2000_0_50_10	50	160	250	19	20	5,26	1,01	93,57	10
FA_2000_2000_0_60_10	60	110	250	19	21	10,53	1,04	142,39	19
FA_2000_2000_0_70_10	70	80	250	18	18		1,00	68,45	8
FA_2000_2000_0_80_10	80	60	250	17	17		1,04	43,25	4
FA_2000_2000_0_90_10	90	40	250	16	16		1,06	45,72	5
FA_2000_2000_0_100_10	100	40	250	17	17		1,08	47,93	5
FA_2000_2000_10_1_4	1	900.000	250	21	21		1,01	127.359,05	50
FA_2000_2000_10_2_4	2	225.000	250	21	22	4,76	1,04	82.742,46	100
FA_2000_2000_10_3_4	3	100.000	250	21	21		1,01	24.179,81	50
FA_2000_2000_10_4_4	4	56.250	250	21	21		1,01	9.130,67	50
FA_2000_2000_10_5_4	5	36.000	250	21	21		1,00	5.529,22	50
FA_2000_2000_10_10_4	10	9.000	250	21	21		1,01	1.375,72	33
FA_2000_2000_10_15_4	15	4.000	250	21	22	4,76	1,03	964,83	43
FA_2000_2000_10_20_4	20	2.250	250	21	21		1,01	410,19	26
FA_2000_2000_10_30_4	30	1.000	250	21	23	9,52	1,03	408,76	44
FA_2000_2000_10_40_4	40	550	250	20	21	5,00	1,00	197,01	28

Scenario ID	min D	Scenario sensors	Sensor range	Theoretical min N of sensors	Final calculated N of sensors	Difference %	Achieved coverage ratio	Algorithm exec time (sec)	N of iterations
FA_2000_2000_10_50_4	50	350	250	20	20		1,01	73,98	11
FA_2000_2000_10_60_4	60	250	250	20	25	25,00	1,03	242,66	45
FA_2000_2000_10_70_4	70	175	250	20	23	15,00	1,07	128,93	26
FA_2000_2000_10_80_4	80	125	250	20	21	5,00	1,02	57,86	10
FA_2000_2000_10_90_4	90	100	250	19	21	10,53	1,04	69,46	15
FA_2000_2000_10_100_4	100	75	250	19	22	15,79	1,05	74,40	13
FA_2000_2000_10_1_6	1	600.000	250	21	21		1,01	93.522,55	50
FA_2000_2000_10_2_6	2	150.000	250	21	21		1,02	41.122,17	50
FA_2000_2000_10_3_6	3	66.666	250	21	21		1,01	15.112,93	50
FA_2000_2000_10_4_6	4	37.500	250	21	21		1,01	4.613,61	40
FA_2000_2000_10_5_6	5	24.000	250	21	21		1,01	3.080,74	33
FA_2000_2000_10_10_6	10	6.000	250	21	21		1,02	888,21	29
FA_2000_2000_10_15_6	15	2.666	250	21	22	4,76	1,03	1.017,98	65
FA_2000_2000_10_20_6	20	1.500	250	21	22	4,76	1,02	360,98	28
FA_2000_2000_10_30_6	30	666	250	20	23	15,00	1,03	316,82	44
FA_2000_2000_10_40_6	40	366	250	20	23	15,00	1,05	236,16	40
FA_2000_2000_10_50_6	50	233	250	20	23	15,00	1,04	157,33	30
FA_2000_2000_10_60_6	60	166	250	19	21	10,53	1,04	104,34	21
FA_2000_2000_10_70_6	70	116	250	19	20	5,26	1,01	47,75	8
FA_2000_2000_10_80_6	80	83	250	19	20	5,26	1,02	45,15	9
FA_2000_2000_10_90_6	90	66	250	18	19	5,56	1,01	46,67	8
FA_2000_2000_10_100_6	100	50	250	17	19	11,76	1,04	53,17	10
FA_2000_2000_10_1_8	1	450.000	250	21	21		1,00	49.977,36	50
FA_2000_2000_10_2_8	2	112.500	250	21	21		1,02	18.159,67	50
FA_2000_2000_10_3_8	3	50.000	250	21	21		1,02	4.030,92	29
FA_2000_2000_10_4_8	4	28.125	250	21	21		1,00	3.850,54	50
FA_2000_2000_10_5_8	5	18.000	250	21	21		1,00	2.096,52	33
FA_2000_2000_10_10_8	10	4.500	250	21	21		1,02	545,83	23
FA_2000_2000_10_15_8	15	2.000	250	21	22	4,76	1,02	397,45	30
FA_2000_2000_10_20_8	20	1.125	250	21	21		1,01	210,77	21
FA_2000_2000_10_30_8	30	500	250	20	21	5,00	1,03	163,72	26
FA_2000_2000_10_40_8	40	275	250	20	23	15,00	1,03	183,50	38
FA_2000_2000_10_50_8	50	175	250	19	21	10,53	1,02	115,45	24
FA_2000_2000_10_60_8	60	125	250	19	22	15,79	1,01	106,01	22
FA_2000_2000_10_70_8	70	87	250	19	20	5,26	1,03	50,22	10
FA_2000_2000_10_80_8	80	62	250	19	20	5,26	1,02	38,16	7
FA_2000_2000_10_90_8	90	50	250	18	18		1,06	4,54	3
FA_2000_2000_10_100_8	100	37	250	16	16		1,08	23,06	3
FA_2000_2000_10_1_10	1	360.000	250	21	21		1,00	42.094,14	50
FA_2000_2000_10_2_10	2	90.000	250	21	21		1,02	12.011,44	50
FA_2000_2000_10_3_10	3	40.000	250	21	21		1,01	5.946,81	50
FA_2000_2000_10_4_10	4	22.500	250	21	21		1,01	3.328,58	43
FA_2000_2000_10_5_10	5	14.400	250	21	21		1,03	2.128,98	50
FA_2000_2000_10_10_10	10	3.600	250	21	21		1,01	655,00	38
FA_2000_2000_10_15_10	15	1.600	250	21	22	4,76	1,02	422,48	41
FA_2000_2000_10_20_10	20	900	250	21	22	4,76	1,01	204,63	24
FA_2000_2000_10_30_10	30	400	250	20	21	5,00	1,02	106,93	16
FA_2000_2000_10_40_10	40	220	250	19	19		1,02	40,92	5
FA_2000_2000_10_50_10	50	140	250	20	20		1,00	41,27	6
FA_2000_2000_10_60_10	60	100	250	19	21	10,53	1,04	67,21	14
FA_2000_2000_10_70_10	70	70	250	17	21	23,53	1,09	111,97	28
FA_2000_2000_10_80_10	80	50	250	18	18		1,04	28,80	4

Scenario ID	min D	Scenario sensors	Sensor range	Theoretical min N of sensors	Final calculated N of sensors	Difference %	Achieved coverage ratio	Algorithm exec time (sec)	N of iterations
FA_2000_2000_10_90_10	90	40	250	18	19	5,56	1,08	28,52	4
FA_2000_2000_10_100_10	100	30	250	14	14		1,03	21,38	2
FA_2000_2000_20_1_4	1	800.000	250	21	21		1,02	82.481,83	50
FA_2000_2000_20_2_4	2	200.000	250	21	21		1,01	27.213,44	50
FA_2000_2000_20_3_4	3	88.750	250	21	21		1,00	16.688,90	50
FA_2000_2000_20_4_4	4	50.000	250	21	21		1,01	11.909,25	50
FA_2000_2000_20_5_4	5	32.000	250	21	21		1,00	8.557,33	50
FA_2000_2000_20_10_4	10	8.000	250	21	21		1,01	2.032,21	36
FA_2000_2000_20_15_4	15	3.550	250	21	21		1,01	731,84	22
FA_2000_2000_20_20_4	20	2.000	250	21	23	9,52	1,03	1.205,46	61
FA_2000_2000_20_30_4	30	875	250	21	24	14,29	1,02	644,97	50
FA_2000_2000_20_40_4	40	500	250	20	21	5,00	1,01	281,25	30
FA_2000_2000_20_50_4	50	300	250	20	20		1,03	106,65	11
FA_2000_2000_20_60_4	60	200	250	19	22	15,79	1,03	213,11	30
FA_2000_2000_20_70_4	70	150	250	19	21	10,53	1,06	148,97	18
FA_2000_2000_20_80_4	80	125	250	19	19		1,01	51,92	5
FA_2000_2000_20_90_4	90	75	250	19	21	10,53	1,02	79,84	11
FA_2000_2000_20_100_4	100	75	250	19	20	5,26	1,06	74,10	9
FA_2000_2000_20_1_6	1	533.333	250	21	22	4,76	1,02	115.135,13	100
FA_2000_2000_20_2_6	2	133.333	250	21	21		1,02	22.255,56	50
FA_2000_2000_20_3_6	3	59.166	250	21	21		1,01	7.088,97	23
FA_2000_2000_20_4_6	4	33.333	250	21	21		1,02	7.240,66	41
FA_2000_2000_20_5_6	5	21.333	250	21	21		1,01	3.124,97	24
FA_2000_2000_20_10_6	10	5.333	250	21	21		1,03	898,87	18
FA_2000_2000_20_15_6	15	2.366	250	21	22	4,76	1,03	957,55	40
FA_2000_2000_20_20_6	20	1.333	250	21	21		1,00	389,47	20
FA_2000_2000_20_30_6	30	583	250	20	21	5,00	1,03	291,85	25
FA_2000_2000_20_40_6	40	333	250	20	20		1,00	84,79	8
FA_2000_2000_20_50_6	50	200	250	20	21	5,00	1,02	136,95	16
FA_2000_2000_20_60_6	60	133	250	19	20	5,26	1,00	82,95	10
FA_2000_2000_20_70_6	70	100	250	18	18		1,02	53,45	7
FA_2000_2000_20_80_6	80	83	250	18	19	5,56	1,00	79,49	11
FA_2000_2000_20_90_6	90	50	250	17	18	5,88	1,03	53,20	7
FA_2000_2000_20_100_6	100	50	250	17	19	11,76	1,01	55,87	7
FA_2000_2000_20_1_8	1	400.000	250	21	21		1,01	41.449,61	46
FA_2000_2000_20_2_8	2	100.000	250	21	21		1,01	14.240,10	34
FA_2000_2000_20_3_8	3	44.375	250	21	21		1,02	10.772,99	50
FA_2000_2000_20_4_8	4	25.000	250	21	22	4,76	1,03	9.589,20	77
FA_2000_2000_20_5_8	5	16.000	250	21	22	4,76	1,04	6.509,24	72
FA_2000_2000_20_10_8	10	4.000	250	21	21		1,00	989,17	27
FA_2000_2000_20_15_8	15	1.775	250	21	21		1,01	331,46	14
FA_2000_2000_20_20_8	20	1.000	250	21	21		1,00	137,33	9
FA_2000_2000_20_30_8	30	437	250	20	24	20,00	1,04	432,08	44
FA_2000_2000_20_40_8	40	250	250	20	21	5,00	1,03	135,27	17
FA_2000_2000_20_50_8	50	150	250	19	20	5,26	1,02	87,78	13
FA_2000_2000_20_60_8	60	100	250	19	20	5,26	1,03	51,79	9
FA_2000_2000_20_70_8	70	75	250	19	19		1,01	20,09	4
FA_2000_2000_20_80_8	80	62	250	18	18		1,07	17,76	4
FA_2000_2000_20_90_8	90	37	250	15	16	6,67	1,08	22,96	5
FA_2000_2000_20_100_8	100	37	250	15	15		1,08	12,00	2
FA_2000_2000_20_1_10	1	320.000	250	21	21		1,01	37.257,09	50
FA_2000_2000_20_2_10	2	80.000	250	21	21		1,01	15.782,40	50

Scenario ID	min D	Scenario sensors	Sensor range	Theoretical min N of sensors	Final calculated N of sensors	Difference %	Achieved coverage ratio	Algorithm exec time (sec)	N of iterations
FA_2000_2000_20_3_10	3	35.500	250	21	21		1,01	5.776,76	28
FA_2000_2000_20_4_10	4	20.000	250	21	21		1,02	3.613,27	29
FA_2000_2000_20_5_10	5	12.800	250	21	21		1,02	3.248,18	42
FA_2000_2000_20_10_10	10	3.200	250	21	21		1,00	276,23	10
FA_2000_2000_20_15_10	15	1.420	250	21	21		1,01	248,68	19
FA_2000_2000_20_20_10	20	800	250	20	21	5,00	1,00	304,91	31
FA_2000_2000_20_30_10	30	350	250	20	21	5,00	1,00	36,31	14
FA_2000_2000_20_40_10	40	200	250	19	20	5,26	1,02	28,14	10
FA_2000_2000_20_50_10	50	120	250	19	22	15,79	1,06	55,34	22
FA_2000_2000_20_60_10	60	80	250	18	18		1,04	12,52	3
FA_2000_2000_20_70_10	70	60	250	17	17		1,09	10,81	4
FA_2000_2000_20_80_10	80	50	250	17	18	5,88	1,09	19,36	8
FA_2000_2000_20_90_10	90	30	250	16	16		1,11	6,49	2
FA_2000_2000_20_100_10	100	30	250	15	15		1,11	11,42	3
FA_2000_2000_30_1_4	1	700.000	250	21	21		1,04	107.068,72	50
FA_2000_2000_30_2_4	2	175.000	250	21	21		1,04	59.996,01	50
FA_2000_2000_30_3_4	3	77.775	250	21	21		1,00	35.957,18	50
FA_2000_2000_30_4_4	4	43.750	250	21	21		1,04	25.062,12	50
FA_2000_2000_30_5_4	5	28.000	250	21	21		1,04	19.037,91	50
FA_2000_2000_30_10_4	10	7.000	250	21	21		1,00	2.209,95	23
FA_2000_2000_30_15_4	15	3.100	250	21	21		1,00	630,51	23
FA_2000_2000_30_20_4	20	1.750	250	21	21		1,02	215,32	14
FA_2000_2000_30_30_4	30	775	250	20	20		1,00	115,38	11
FA_2000_2000_30_40_4	40	425	250	20	21	5,00	1,02	139,61	19
FA_2000_2000_30_50_4	50	275	250	20	23	15,00	1,04	162,83	28
FA_2000_2000_30_60_4	60	175	250	17	17		1,00	9,56	7
FA_2000_2000_30_70_4	70	125	250	20	21	5,00	1,02	52,25	8
FA_2000_2000_30_80_4	80	100	250	20	21	5,00	1,05	13,47	11
FA_2000_2000_30_90_4	90	75	250	19	20	5,26	1,05	38,05	5
FA_2000_2000_30_100_4	100	50	250	17	17		1,05	20,94	2
FA_2000_2000_30_1_6	1	466.666	250	21	21		1,02	88.121,77	50
FA_2000_2000_30_2_6	2	116.666	250	21	21		1,04	48.947,23	49
FA_2000_2000_30_3_6	3	51.850	250	21	21		1,05	21.684,67	33
FA_2000_2000_30_4_6	4	29.166	250	21	21		1,04	7.399,64	19
FA_2000_2000_30_5_6	5	18.666	250	21	21		1,01	8.224,04	33
FA_2000_2000_30_10_6	10	4.666	250	21	21		1,04	1.232,01	22
FA_2000_2000_30_15_6	15	2.066	250	21	21		1,01	337,43	20
FA_2000_2000_30_20_6	20	1.166	250	21	22	4,76	1,04	334,15	29
FA_2000_2000_30_30_6	30	516	250	21	21		1,02	92,57	10
FA_2000_2000_30_40_6	40	283	250	20	21	5,00	1,01	96,41	12
FA_2000_2000_30_50_6	50	183	250	20	20		1,07	29,56	4
FA_2000_2000_30_60_6	60	116	250	18	18		1,04	32,32	5
FA_2000_2000_30_70_6	70	83	250	18	20	11,11	1,06	68,19	11
FA_2000_2000_30_80_6	80	66	250	19	19		1,09	21,22	3
FA_2000_2000_30_90_6	90	50	250	18	18		1,08	16,88	3
FA_2000_2000_30_100_6	100	33	250	12	12		1,01	18,89	3
FA_2000_2000_30_1_8	1	350.000	250	21	21		1,04	73.112,50	39
FA_2000_2000_30_2_8	2	87.500	250	21	21		1,03	39.170,93	50
FA_2000_2000_30_3_8	3	38.887	250	21	21		1,02	16.400,30	33
FA_2000_2000_30_4_8	4	21.875	250	21	21		1,03	10.225,06	35
FA_2000_2000_30_5_8	5	14.000	250	21	22	4,76	1,04	10.281,43	50
FA_2000_2000_30_10_8	10	3.500	250	21	21		1,02	371,24	14

Scenario ID	min D	Scenario sensors	Sensor range	Theoretical min N of sensors	Final calculated N of sensors	Difference %	Achieved coverage ratio	Algorithm exec time (sec)	N of iterations
FA_2000_2000_30_15_8	15	1.550	250	21	21		1,01	219,54	14
FA_2000_2000_30_20_8	20	875	250	20	22	10,00	1,04	314,14	32
FA_2000_2000_30_30_8	30	387	250	20	20		1,02	104,17	12
FA_2000_2000_30_40_8	40	212	250	20	23	15,00	1,02	194,41	31
FA_2000_2000_30_50_8	50	137	250	19	19		1,02	48,41	7
FA_2000_2000_30_60_8	60	87	250	18	21	16,67	1,02	84,10	13
FA_2000_2000_30_70_8	70	62	250	19	19		1,09	17,52	2
FA_2000_2000_30_80_8	80	50	250	15	15		1,02	20,09	3
FA_2000_2000_30_90_8	90	37	250	14	17	21,43	1,11	46,93	7
FA_2000_2000_30_100_8	100	25	250	14	15	7,14	1,11	30,05	5
FA_2000_2000_30_1_10	1	280.000	250	21	21		1,01	19.535,35	50
FA_2000_2000_30_2_10	2	70.000	250	21	21		1,04	4.144,13	40
FA_2000_2000_30_3_10	3	31.110	250	21	21		1,03	1.587,11	34
FA_2000_2000_30_4_10	4	17.500	250	21	21		1,03	1.327,09	50
FA_2000_2000_30_5_10	5	11.200	250	21	21		1,03	630,24	35
FA_2000_2000_30_10_10	10	2.800	250	21	22	4,76	1,01	200,96	34
FA_2000_2000_30_15_10	15	1.240	250	21	21		1,01	54,23	13
FA_2000_2000_30_20_10	20	700	250	21	21		1,05	47,47	15
FA_2000_2000_30_30_10	30	310	250	20	21	5,00	1,02	44,13	19
FA_2000_2000_30_40_10	40	170	250	20	20		1,02	15,48	5
FA_2000_2000_30_50_10	50	110	250	19	19		1,02	13,74	5
FA_2000_2000_30_60_10	60	70	250	18	18		1,05	13,02	4
FA_2000_2000_30_70_10	70	50	250	15	16	6,67	1,05	10,75	4
FA_2000_2000_30_80_10	80	40	250	16	16		1,04	8,55	3
FA_2000_2000_30_90_10	90	30	250	16	16		1,11	11,36	3
FA_2000_2000_30_100_10	100	20	250	12	14	16,67	1,11	12,71	5
FA_2000_2000_40_1_4	1	600.000	250	21	21		1,02	93.888,17	50
FA_2000_2000_40_2_4	2	150.000	250	21	22	4,76	1,04	67.358,41	82
FA_2000_2000_40_3_4	3	66.650	250	21	21		1,02	32.173,28	50
FA_2000_2000_40_4_4	4	37.500	250	21	21		1,00	20.280,77	45
FA_2000_2000_40_5_4	5	24.000	250	21	21		1,01	8.915,82	28
FA_2000_2000_40_10_4	10	6.000	250	21	21		1,02	2.793,03	27
FA_2000_2000_40_15_4	15	2.650	250	21	21		1,02	1.068,30	19
FA_2000_2000_40_20_4	20	1.500	250	21	23	9,52	1,02	1.685,58	46
FA_2000_2000_40_30_4	30	650	250	20	22	10,00	1,04	901,61	40
FA_2000_2000_40_40_4	40	375	250	20	21	5,00	1,01	229,38	17
FA_2000_2000_40_50_4	50	225	250	20	23	15,00	1,04	202,61	18
FA_2000_2000_40_60_4	60	150	250	19	20	5,26	1,03	131,10	14
FA_2000_2000_40_70_4	70	100	250	18	20	11,11	1,02	114,26	13
FA_2000_2000_40_80_4	80	75	250	19	21	10,53	1,09	78,78	9
FA_2000_2000_40_90_4	90	50	250	17	17		1,04	27,88	3
FA_2000_2000_40_100_4	100	50	250	18	19	5,56	1,08	53,43	6
FA_2000_2000_40_1_6	1	400.000	250	21	21		1,02	79.884,79	50
FA_2000_2000_40_2_6	2	100.000	250	21	21		1,02	32.560,67	35
FA_2000_2000_40_3_6	3	44.433	250	21	21		1,02	21.410,05	41
FA_2000_2000_40_4_6	4	25.000	250	21	21		1,02	15.769,35	50
FA_2000_2000_40_5_6	5	16.000	250	21	21		1,02	10.404,30	49
FA_2000_2000_40_10_6	10	4.000	250	21	22	4,76	1,04	2.275,66	32
FA_2000_2000_40_15_6	15	1.766	250	21	22	4,76	1,04	1.584,53	39
FA_2000_2000_40_20_6	20	1.000	250	20	20		1,02	409,40	17
FA_2000_2000_40_30_6	30	433	250	20	21	5,00	1,01	243,85	17
FA_2000_2000_40_40_6	40	250	250	19	22	15,79	1,05	465,46	31



Scenario ID	min D	Scenario sensors	Sensor range	Theoretical min N of sensors	Final calculated N of sensors	Difference %	Achieved coverage ratio	Algorithm exec time (sec)	N of iterations
FA_2000_2000_40_50_6	50	150	250	19	21	10,53	1,05	163,16	16
FA_2000_2000_40_60_6	60	100	250	19	24	26,32	1,01	249,45	22
FA_2000_2000_40_70_6	70	66	250	18	19	5,56	1,02	70,73	8
FA_2000_2000_40_80_6	80	50	250	18	18		1,04	27,65	3
FA_2000_2000_40_90_6	90	33	250	16	16		1,11	30,46	3
FA_2000_2000_40_100_6	100	33	250	17	17		1,11	25,59	2
FA_2000_2000_40_1_8	1	300.000	250	21	21		1,02	71.916,73	50
FA_2000_2000_40_2_8	2	75.000	250	21	21		1,03	35.403,08	50
FA_2000_2000_40_3_8	3	33.325	250	21	22	4,76	1,05	26.599,71	68
FA_2000_2000_40_4_8	4	18.750	250	21	21		1,01	9.969,80	40
FA_2000_2000_40_5_8	5	12.000	250	21	21		1,03	5.248,54	31
FA_2000_2000_40_10_8	10	3.000	250	21	21		1,01	1.051,58	17
FA_2000_2000_40_15_8	15	1.325	250	21	22	4,76	1,02	1.802,32	51
FA_2000_2000_40_20_8	20	750	250	20	22	10,00	1,04	931,89	37
FA_2000_2000_40_30_8	30	325	250	20	22	10,00	1,07	623,56	33
FA_2000_2000_40_40_8	40	187	250	20	22	10,00	1,01	269,53	19
FA_2000_2000_40_50_8	50	112	250	19	19		1,04	78,83	6
FA_2000_2000_40_60_8	60	75	250	18	18		1,02	40,57	3
FA_2000_2000_40_70_8	70	50	250	16	17	6,25	1,02	90,02	8
FA_2000_2000_40_80_8	80	37	250	16	16		1,07	26,80	2
FA_2000_2000_40_90_8	90	25	250	15	15		1,06	33,75	2
FA_2000_2000_40_100_8	100	25	250	16	16		1,11	29,17	2
FA_2000_2000_40_1_10	1	240.000	250	21	21		1,01	66.436,34	50
FA_2000_2000_40_2_10	2	60.000	250	21	21		1,03	31.282,43	50
FA_2000_2000_40_3_10	3	26.660	250	21	21		1,02	13.962,15	42
FA_2000_2000_40_4_10	4	15.000	250	21	21		1,01	5.504,10	24
FA_2000_2000_40_5_10	5	9.600	250	21	22	4,76	1,04	6.381,78	44
FA_2000_2000_40_10_10	10	2.400	250	21	21		1,02	808,38	15
FA_2000_2000_40_15_10	15	1.060	250	21	21		1,04	446,30	15
FA_2000_2000_40_20_10	20	600	250	20	23	15,00	1,04	937,88	42
FA_2000_2000_40_30_10	30	260	250	20	21	5,00	1,00	148,57	11
FA_2000_2000_40_40_10	40	150	250	19	22	15,79	1,04	369,61	27
FA_2000_2000_40_50_10	50	90	250	18	19	5,56	1,04	103,67	9
FA_2000_2000_40_60_10	60	60	250	19	21	10,53	1,08	122,61	10
FA_2000_2000_40_70_10	70	40	250	15	16	6,67	1,07	74,94	7
FA_2000_2000_40_80_10	80	30	250	15	15		1,00	25,30	1
FA_2000_2000_40_90_10	90	20	250	14	14		1,11	24,98	1
FA_2000_2000_40_100_10	100	20	250	14	14		1,05	22,81	1
FA_2000_2000_50_1_4	1	500.000	250	21	21		1,03	88.468,05	50
FA_2000_2000_50_2_4	2	125.000	250	21	21		1,02	48.441,98	50
FA_2000_2000_50_3_4	3	55.550	250	21	21		1,02	27.328,60	47
FA_2000_2000_50_4_4	4	31.250	250	21	21		1,02	11.856,45	29
FA_2000_2000_50_5_4	5	20.000	250	21	21		1,02	12.750,75	50
FA_2000_2000_50_10_4	10	5.000	250	21	21		1,01	2.572,35	28
FA_2000_2000_50_15_4	15	2.200	250	21	22	4,76	1,03	1.432,03	29
FA_2000_2000_50_20_4	20	1.250	250	21	21		1,04	666,71	18
FA_2000_2000_50_30_4	30	550	250	20	23	15,00	1,04	916,68	41
FA_2000_2000_50_40_4	40	300	250	20	20		1,04	189,83	8
FA_2000_2000_50_50_4	50	200	250	20	21	5,00	1,03	294,31	15
FA_2000_2000_50_60_4	60	125	250	20	24	20,00	1,02	415,26	25
FA_2000_2000_50_70_4	70	100	250	17	19	11,76	1,03	210,20	12
FA_2000_2000_50_80_4	80	75	250	17	17		1,05	96,55	5

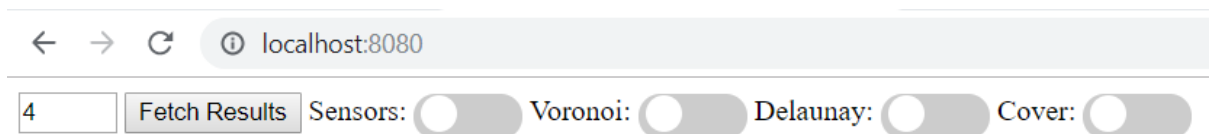
Scenario ID	min D	Scenario sensors	Sensor range	Theoretical min N of sensors	Final calculated N of sensors	Difference %	Achieved coverage ratio	Algorithm exec time (sec)	N of iterations
FA_2000_2000_50_90_4	90	50	250	16	16		1,08	51,80	2
FA_2000_2000_50_100_4	100	50	250	15	16	6,67	1,02	116,21	5
FA_2000_2000_50_1_6	1	333.333	250	21	21		1,01	79.159,58	50
FA_2000_2000_50_2_6	2	83.333	250	21	21		1,01	36.011,47	47
FA_2000_2000_50_3_6	3	37.033	250	21	21		1,03	18.909,68	39
FA_2000_2000_50_4_6	4	20.833	250	21	21		1,02	12.189,23	42
FA_2000_2000_50_5_6	5	13.333	250	21	21		1,03	9.016,49	50
FA_2000_2000_50_10_6	10	3.333	250	21	21		1,03	2.225,45	34
FA_2000_2000_50_15_6	15	1.466	250	21	22	4,76	1,05	1.505,77	43
FA_2000_2000_50_20_6	20	833	250	21	21		1,06	345,12	10
FA_2000_2000_50_30_6	30	366	250	20	21	5,00	1,03	357,78	16
FA_2000_2000_50_40_6	40	200	250	20	23	15,00	1,06	29,36	22
FA_2000_2000_50_50_6	50	133	250	19	21	10,53	1,04	272,16	15
FA_2000_2000_50_60_6	60	83	250	18	21	16,67	1,03	281,21	16
FA_2000_2000_50_70_6	70	66	250	19	20	5,26	1,09	178,59	9
FA_2000_2000_50_80_6	80	50	250	18	19	5,56	1,05	116,59	6
FA_2000_2000_50_90_6	90	33	250	17	18	5,88	1,11	82,43	4
FA_2000_2000_50_100_6	100	33	250	13	13		1,11	49,16	2
FA_2000_2000_50_1_8	1	250.000	250	21	21		1,02	57.198,38	32
FA_2000_2000_50_2_8	2	62.500	250	21	21		1,00	31.185,42	50
FA_2000_2000_50_3_8	3	27.775	250	21	21		1,02	14.238,47	40
FA_2000_2000_50_4_8	4	15.625	250	21	21		1,01	5.358,31	22
FA_2000_2000_50_5_8	5	10.000	250	21	21		1,01	3.654,48	22
FA_2000_2000_50_10_8	10	2.500	250	21	22	4,76	1,01	1.263,70	22
FA_2000_2000_50_15_8	15	1.100	250	20	20		1,02	348,71	9
FA_2000_2000_50_20_8	20	625	250	20	23	15,00	1,01	1.021,13	42
FA_2000_2000_50_30_8	30	275	250	20	21	5,00	1,01	360,80	17
FA_2000_2000_50_40_8	40	150	250	19	20	5,26	1,02	223,43	12
FA_2000_2000_50_50_8	50	100	250	19	19		1,03	56,94	3
FA_2000_2000_50_60_8	60	62	250	16	17	6,25	1,08	144,76	9
FA_2000_2000_50_70_8	70	50	250	14	14		1,04	74,94	4
FA_2000_2000_50_80_8	80	37	250	17	19	11,76	1,07	143,23	8
FA_2000_2000_50_90_8	90	25	250	15	15		1,05	40,67	2
FA_2000_2000_50_100_8	100	25	250	16	17	6,25	1,11	58,53	3
FA_2000_2000_50_1_10	1	200.000	250	21	21		1,03	60.814,05	50
FA_2000_2000_50_2_10	2	50.000	250	21	22	4,76	1,02	35.846,82	75
FA_2000_2000_50_3_10	3	22.220	250	21	21		1,02	10.970,28	36
FA_2000_2000_50_4_10	4	12.500	250	21	22	4,76	1,03	10.704,32	62
FA_2000_2000_50_5_10	5	8.000	250	21	21		1,02	3.270,91	25
FA_2000_2000_50_10_10	10	2.000	250	21	21		1,03	1.071,87	22
FA_2000_2000_50_15_10	15	880	250	20	22	10,00	1,01	879,01	29
FA_2000_2000_50_20_10	20	500	250	20	21	5,00	1,01	543,67	22
FA_2000_2000_50_30_10	30	220	250	19	21	10,53	1,02	332,65	17
FA_2000_2000_50_40_10	40	120	250	20	20		1,07	91,82	5
FA_2000_2000_50_50_10	50	80	250	18	22	22,22	1,03	390,29	23
FA_2000_2000_50_60_10	60	50	250	17	17		1,08	35,59	2
FA_2000_2000_50_70_10	70	40	250	16	17	6,25	1,03	67,41	4
FA_2000_2000_50_80_10	80	30	250	15	15		1,11	53,02	3
FA_2000_2000_50_90_10	90	20	250	12	12		1,11	35,21	2
FA_2000_2000_50_100_10	100	20	250	14	14		1,11	24,98	1

## 4.6 Ανάλυση συμπεριφοράς αλγορίθμου - evaluation

### 4.6.1 Οπτικοποίηση λειτουργίας αλγορίθμου

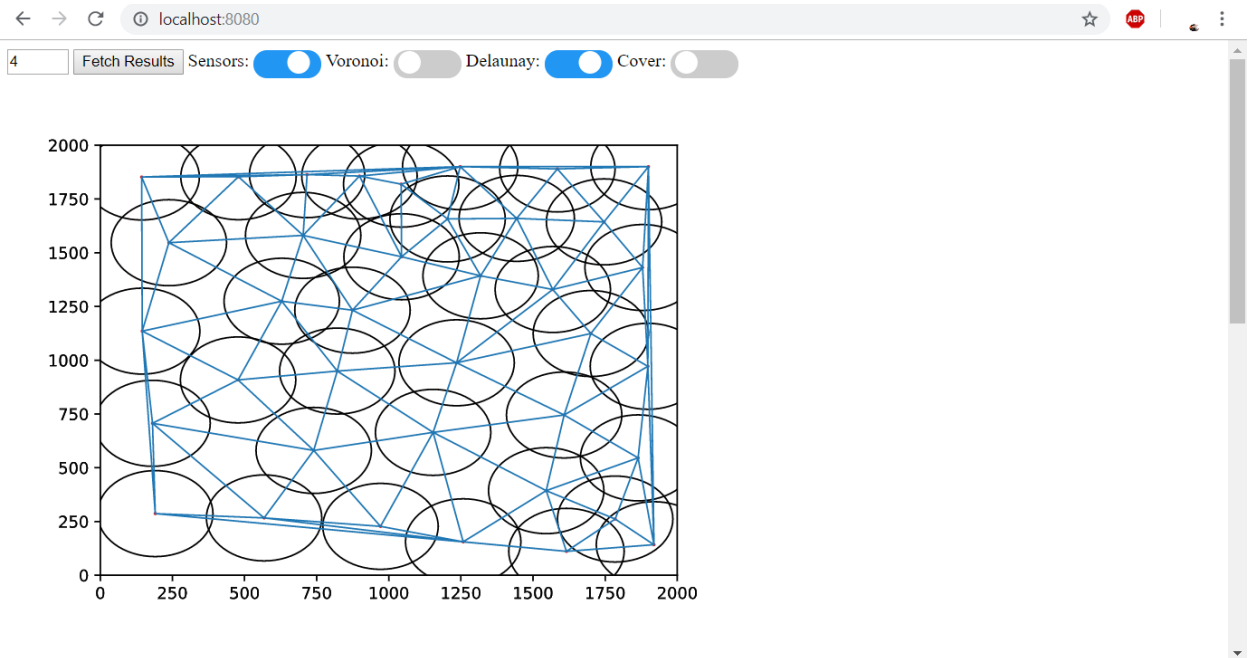
Η τροποποιημένη έκδοση του OptEval σε κάθε βήμα του αλγορίθμου και εφόσον δημιουργήσει μια νέα κάλυψη αποθηκεύει τα εξής svg ( circlesX. svg, coveredX. svg, delaunayX. svg, voronoiX. svg). Όπου X πρόκειται για τον αριθμό της επανάληψης. Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασία αναπτύχθηκε frontEnd Backend υπηρεσία που κάνει υπέρθεση αυτών των svg με σκοπό να βλέπει για μια δεδομένη επανάληψη όσες από αυτές τις τέσσερις εικόνες χρειάζεται. Η διαδικασία είναι ως εξής:

- Ο χρήστης ανοίγει το frontEnd και επιλεγεί τον αριθμό της επανάληψης και πατάει Fetch Results

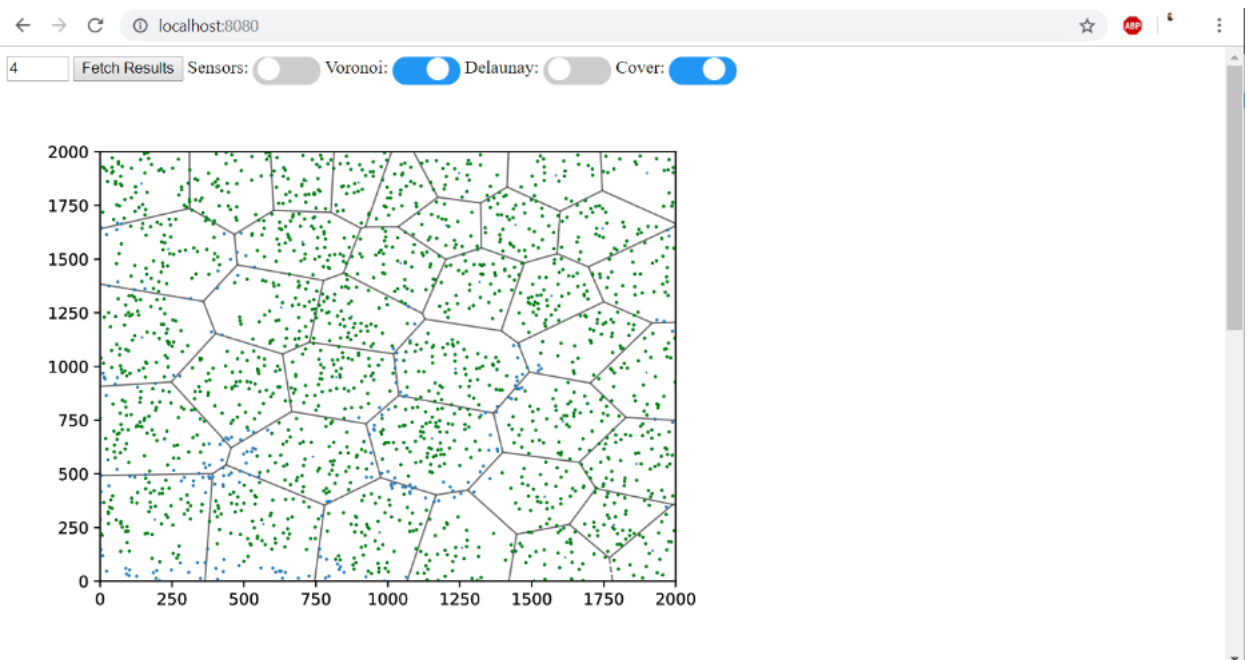


Εικόνα 89: Δυνατότητες λογισμικού οπτικοποίησης

- Έπειτα το frontEnd κάνει αίτημα στο backEnd για να του στείλει τις κατάλληλες εικόνες υπό την μορφή svg.
- Στην συνέχεια το backend φορτώνει τις εικόνες και της στέλνει στο frontEnd. Να σημειωθεί πως για μερικά μεγάλα σενάρια εκτέλεσης που καταλαμβάνουν αρκετά Mb αυτό εδώ το βήμα μπορεί να διαρκέσει αρκετά. Η επικοινωνία γίνεται μέσω webSockets.
- Έπειτα ο χρήστης μέσω των διακοπών μπορεί να επιλέξει για την ενδεχόμενη προβολή κάποιων από τις προαναφερθείσες εικόνες.



Εικόνα 90: Λογισμικό οπτικοποίησης πιθανή συμπεριφορά 1



Εικόνα 91: Λογισμικό οπτικοποίησης πιθανή συμπεριφορά 2

- Τέλος ο χρήστης της υπηρεσίας μπορεί να διαλέξει οποιαδήποτε άλλη επανάληψη συνεχίζοντας όπως αναγράφεται στην πρώτη κουκίδα.

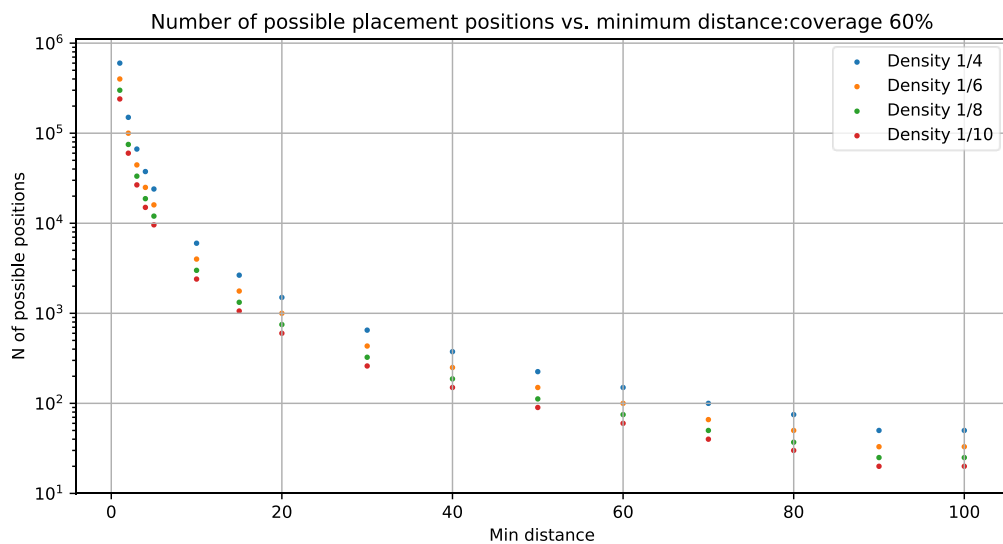
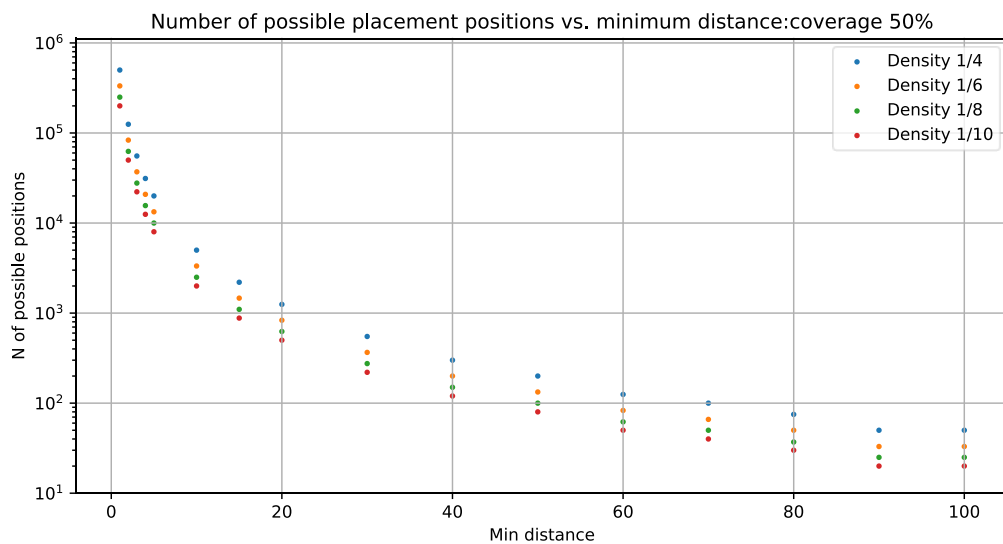
Πρόκειται ουσιαστικά για μια βοηθητική υπηρεσία για να αποκτήσουμε εικόνα για το πως κλιμακώνεται η εκτέλεση του αλγορίθμου στον χρόνο.

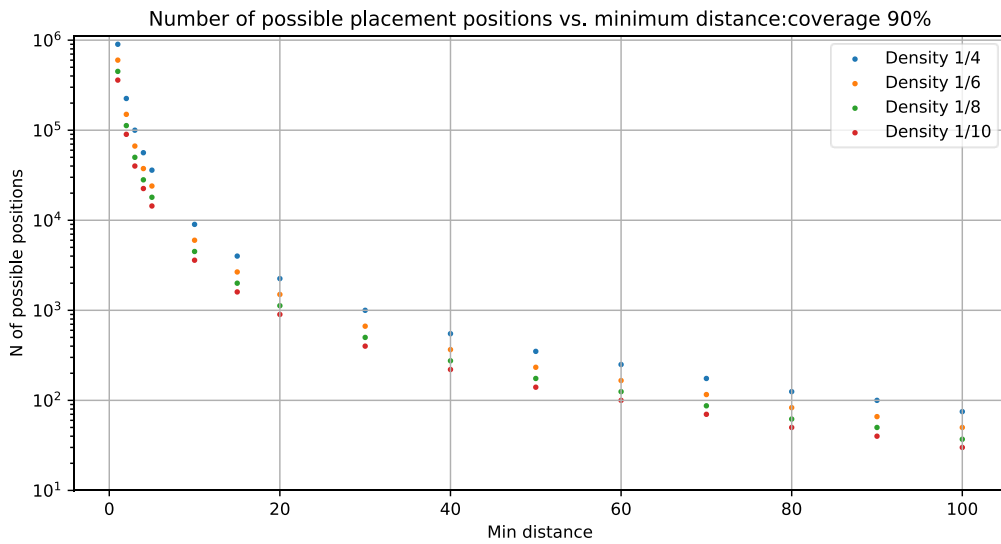
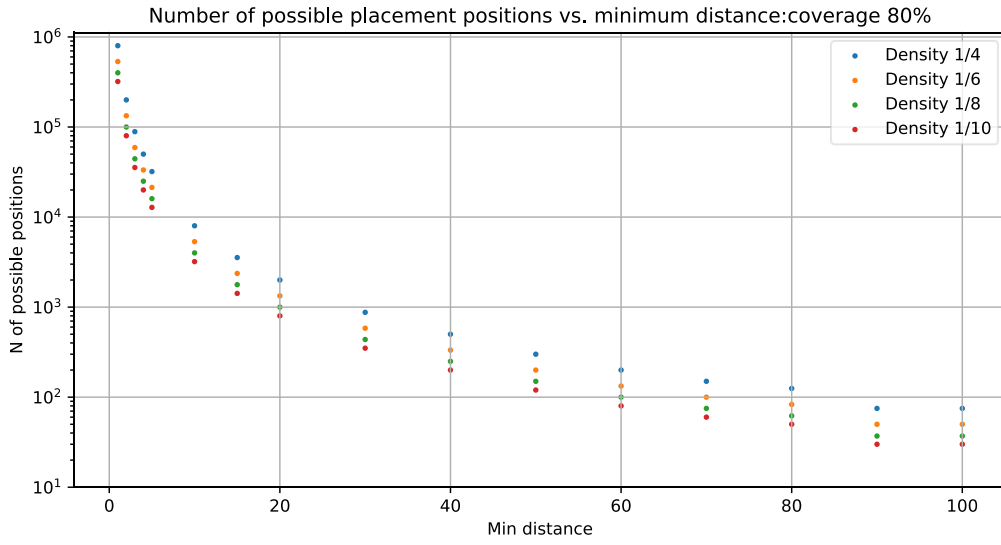
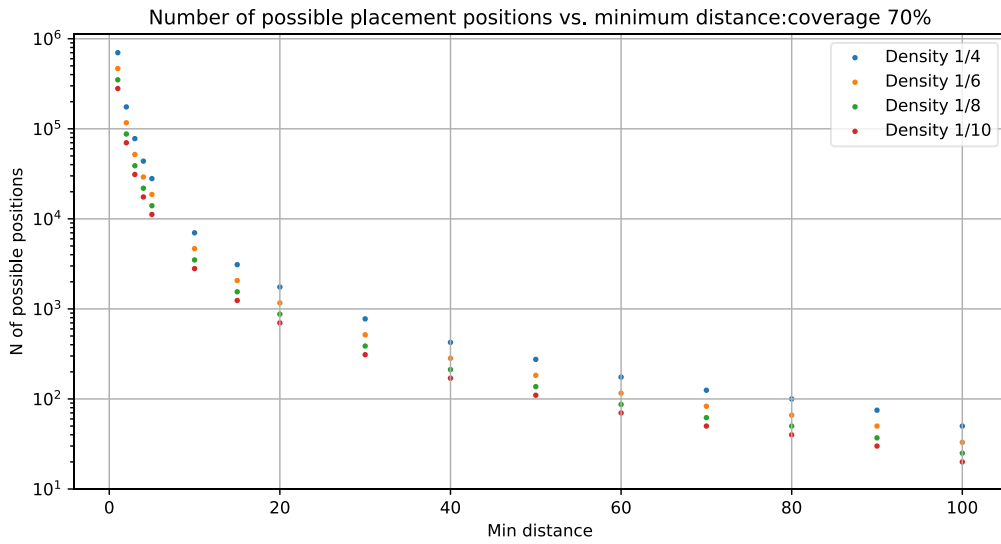
## 4.6.2 Οπτικοποίηση και ανάλυση μετρικών συμπεριφοράς

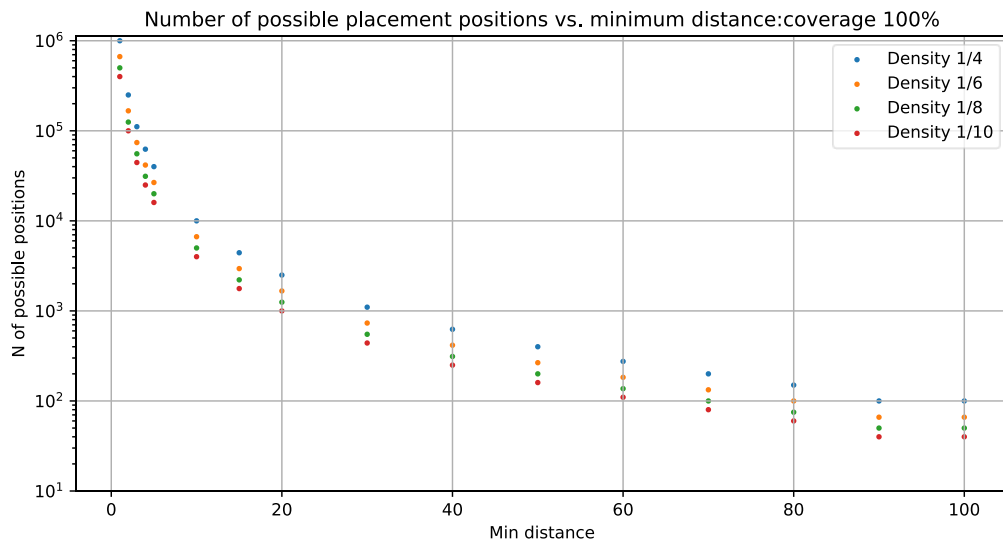
Με βάση τους πίνακες με τις μετρικές των σεναρίων με τα τυχαία σημεία καθώς και με τις μετρικές των εκτελέσεων του OptEval. Συγκεκριμένα δημιουργήθηκαν 8 ομάδες διαγραμμάτων.

### 4.6.2.1 Αριθμός πιθανών θέσεων εγκατάστασης σε σχέση με ελάχιστη απόσταση σημείων

Σε αυτή την ομάδα διαγραμμάτων ανήκουν γραφήματα που προσδιορίζουν για κάθε ποσοστό νεκρής ζώνης το πλήθος των διαθέσιμων σημείων που μπορούν να τοποθετηθούν αισθητήρες σε σχέση με την ελάχιστη δυνατή απόσταση μεταξύ δύο σημείων. Σύνολο 6 διαγράμματα που το κάθε ένα περιέχει πληροφορίες για τα div 4,6,8,10.



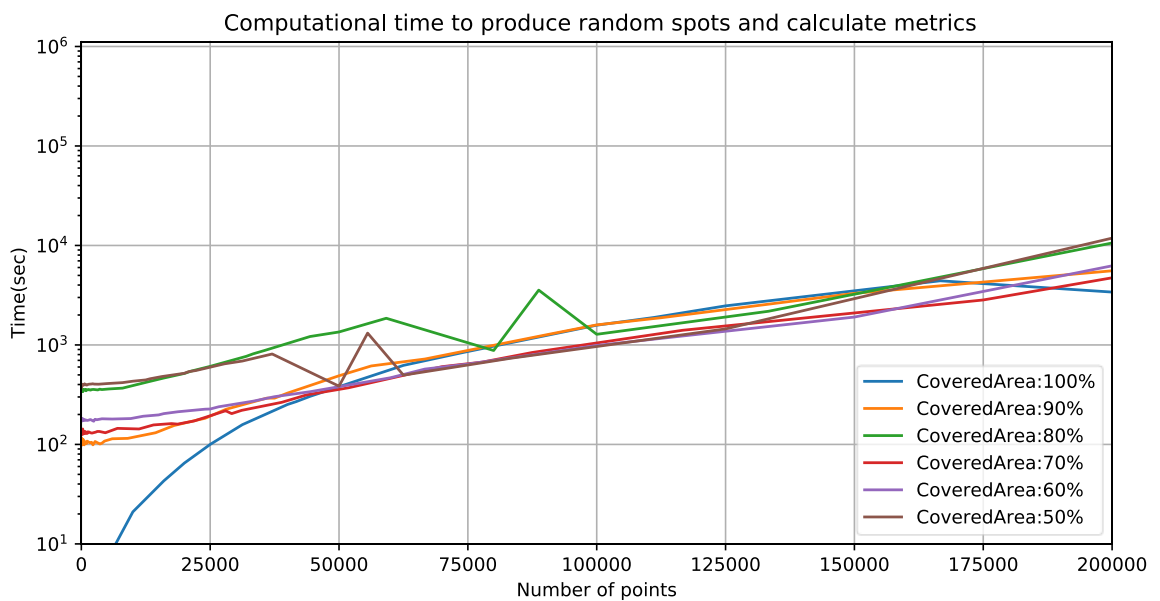


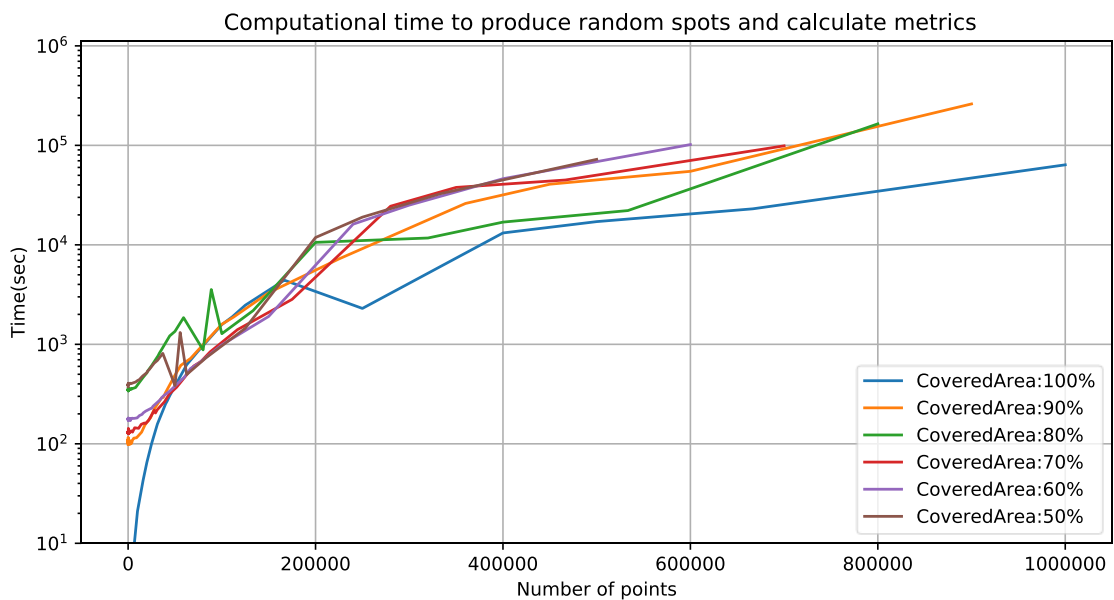
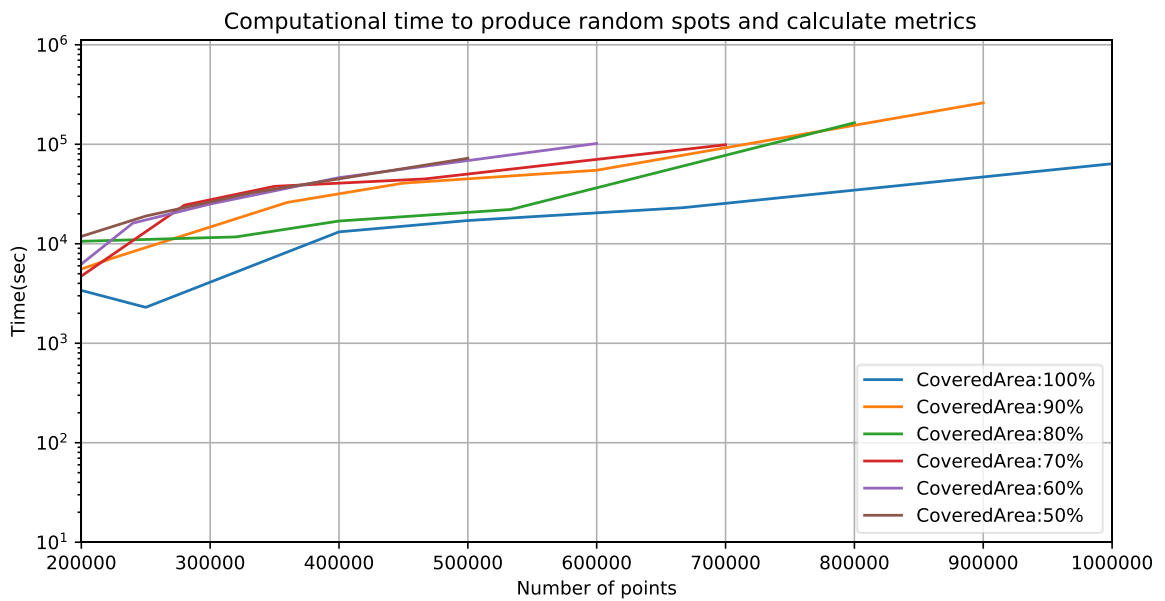


Εικόνα 92: Πλήθος πιθανών σημείων τοποθέτησης αισθητήρων για όλα τα σενάρια τυχαίων σημείων

#### 4.6.2.2 Χρόνος δημιουργίας σεναρίων τυχαίων σημείων και υπολογισμού μετρικών

Σε αυτή την ομάδα διαγραμμάτων ανήκουν γραφήματα που προσδιορίζουν το χρόνο για την δημιουργία των τυχαίων σημείων και τον υπολογισμό των μετρικών που συνδέονται με αυτά. Σύνολο 3 διαγράμματα . Το πρώτο αφορά το εύρος τυχαίων σημείων [0,200000], το δεύτερο [200000,1000000] και το τρίτο είναι η ένωση αυτών.





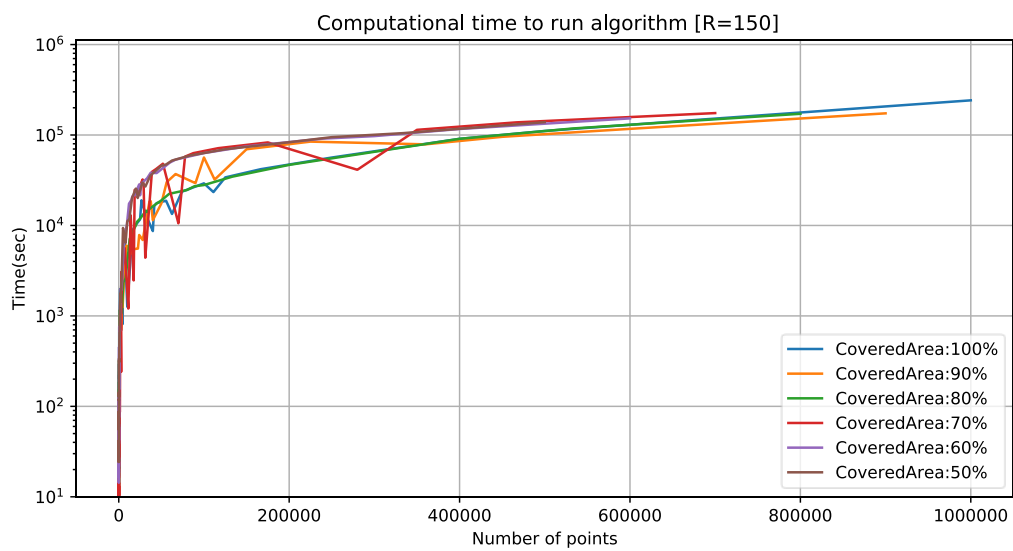
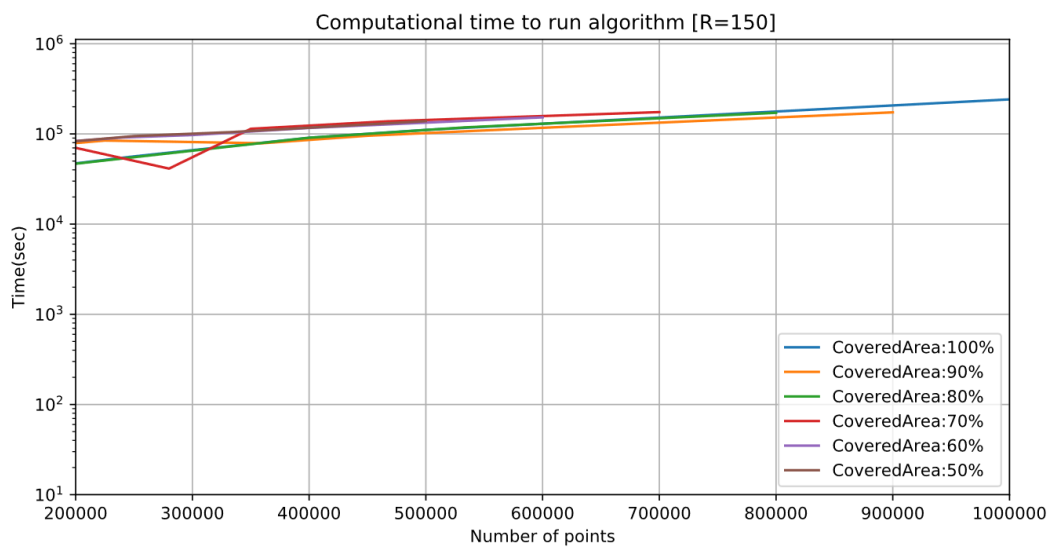
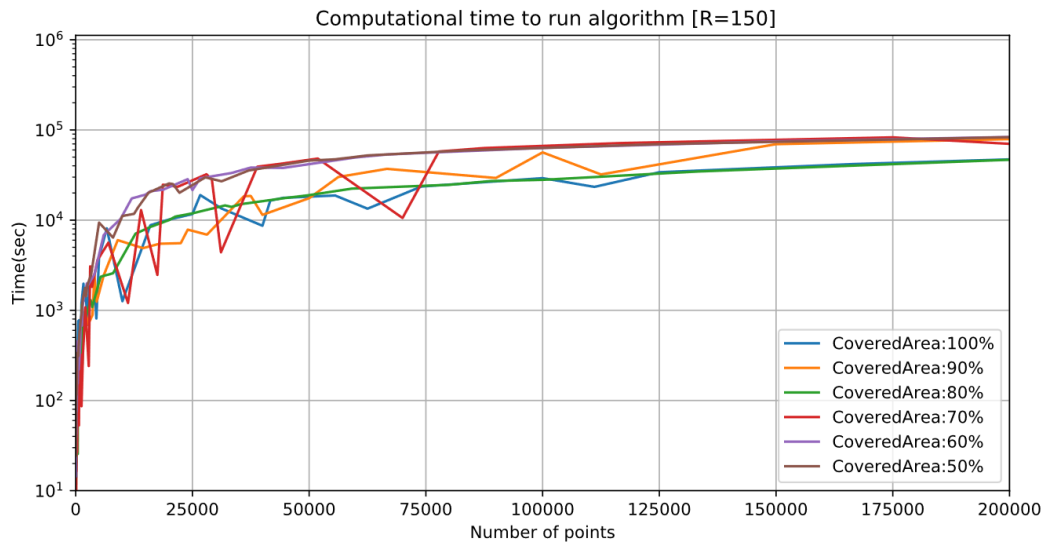
Εικόνα 93: Χρόνος δημιουργίας σεναρίων τυχαίων σημείων

Στα συγκεκριμένα διαγράμματα αξίζει να τονιστεί πως για πλήθος σημείων κοντά στο 0, το γεγονός πως ο χρόνος για σεναρία νεκρής ζώνης πάνω από 0% είναι αρκετά αυξημένος οφείλεται στον υπολογισμό του πίνακα AREA. Να τονιστεί πως στην συγκεκριμένη υλοποίηση για οποιοδήποτε πλήθος πολυγώνων( νεκρές ζώνες) ο χρόνος δημιουργίας του σεναρίου, χωρίς τον υπολογισμό παραμένει μικρός. Στην πράξη μετρήθηκε πως η δημιουργία του πίνακα AREA, επηρεάζεται περισσότερο από το μέγεθος της μεγαλύτερης νεκρής ζώνης, δηλαδή του μεγαλύτερου πολυγώνου.

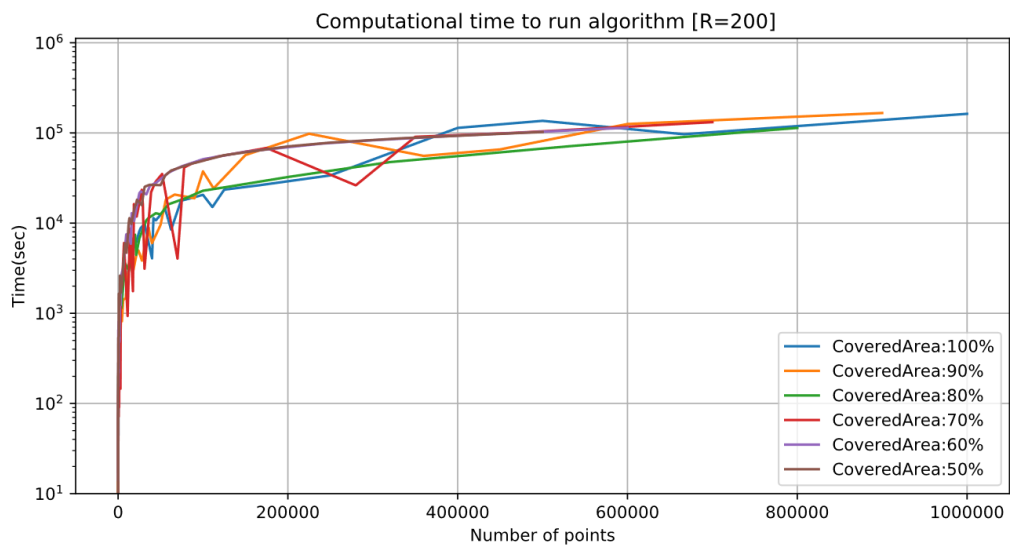
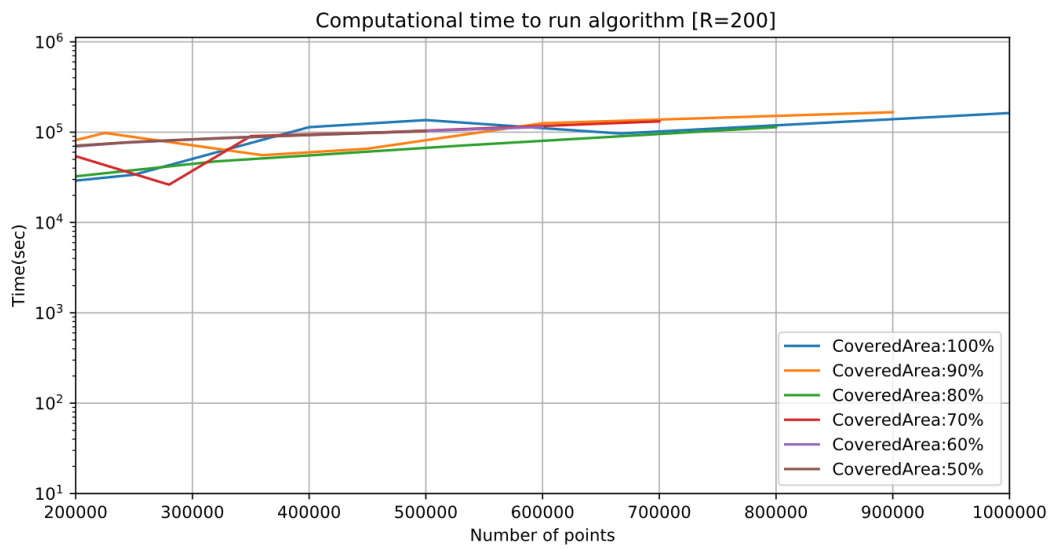
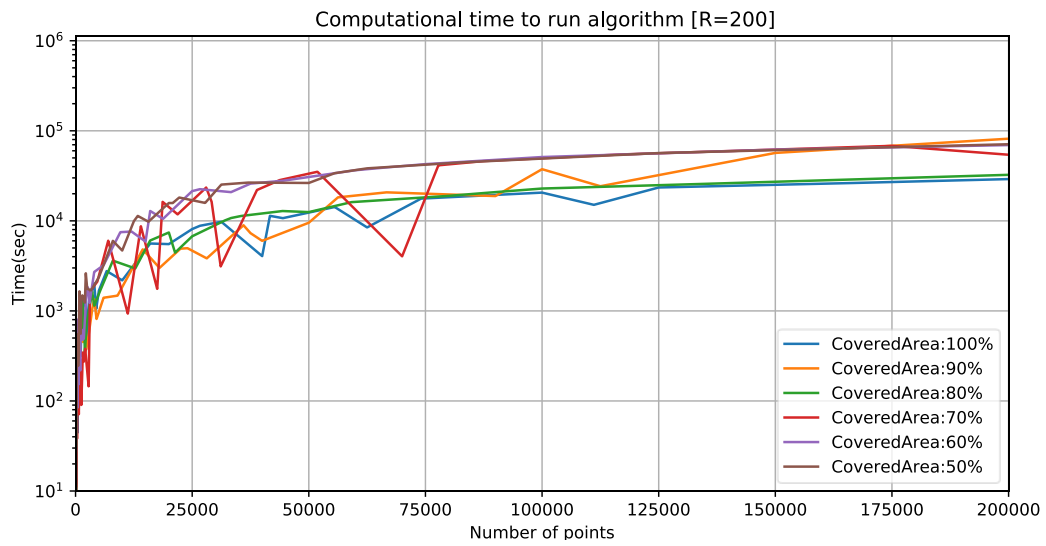


#### 4.6.2.3 Χρόνος εκτέλεσης του λογισμικού OptEval για δεδομένη ακτίνα

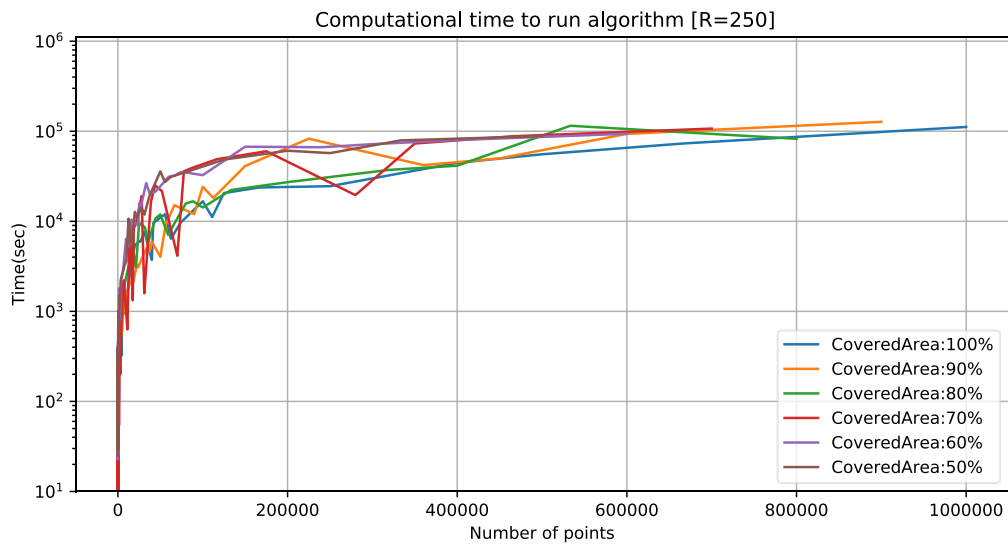
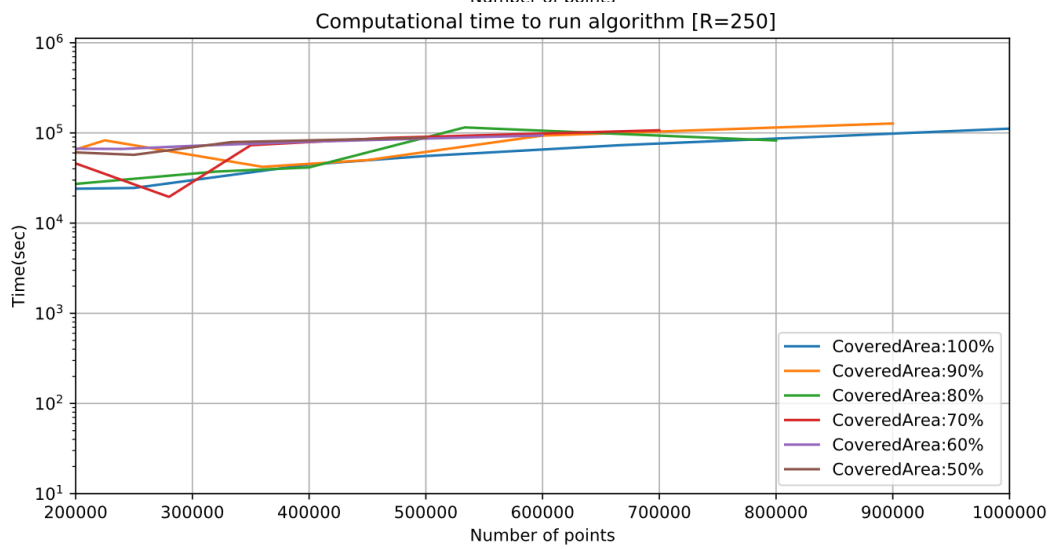
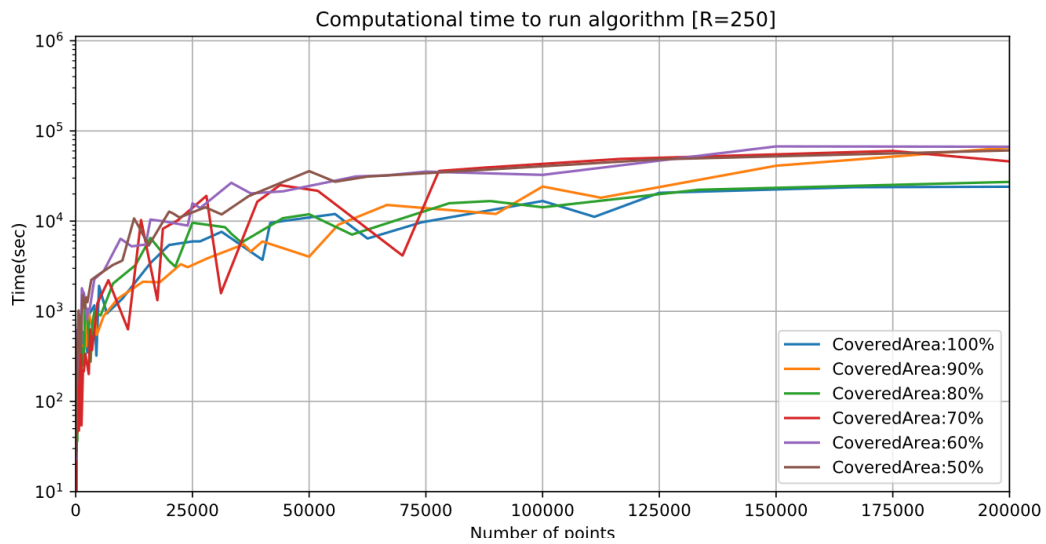
Στις δύο αυτές ομάδες διαγραμμάτων ανήκουν διαγράμματα με τους χρόνους εκτελέσεις του λογισμικού OptEval για κάθε ακτίνα του διαστήματος  $[150,200,250]$  για όλα τα σενάρια τυχαίων σημείων. Σύνολο 18 διαγράμματα 9 για κάθε ομάδα. Για κάθε ακτίνα σπάμε τα διαγράμματα στα εύρη  $[0,200000],[200000,1000000],[0,1000000]$ . Η πρώτη ομάδα αφορά εκτελέσεις του λογισμικού με την μετρική Hausdorff υπολογισμένη πάνω στα πραγματικά σημεία εγκατάστασης, ενώ η δεύτερη πάνω στα θεωρητικά. Τα πρώτα 9 διαγράμματα αφορούν την πρώτη ομάδα και τα υπόλοιπα την δεύτερη.



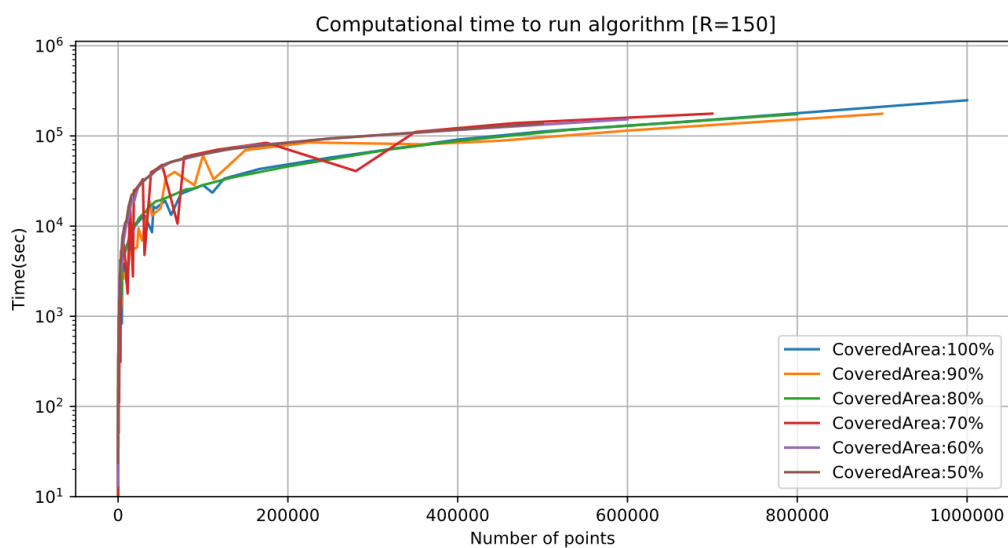
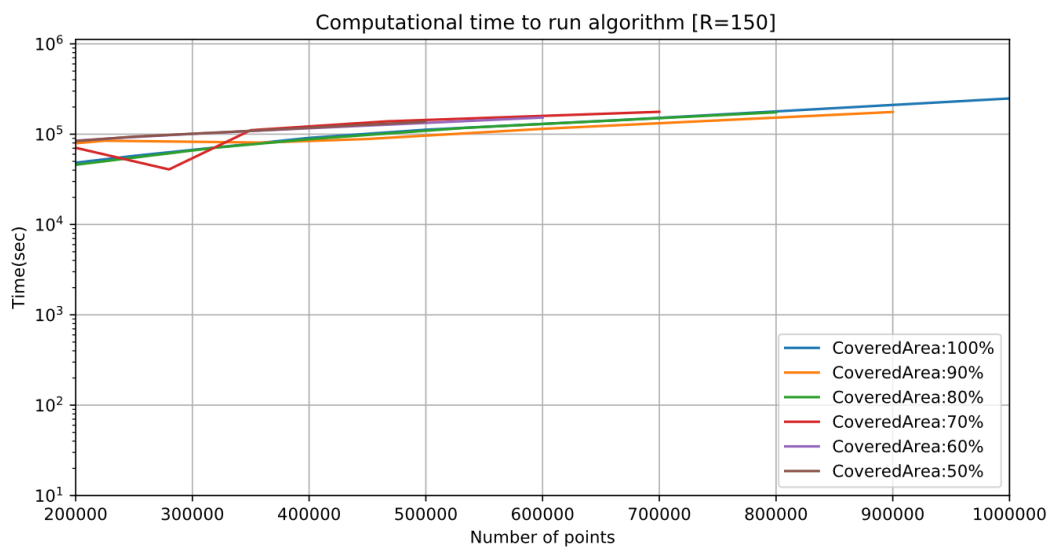
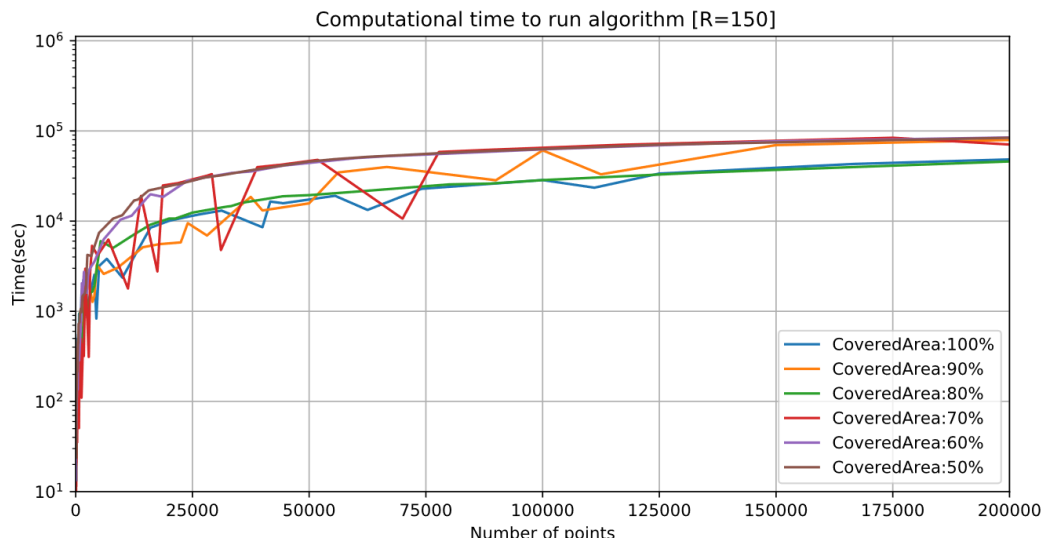
Εικόνα 94: Χρόνος εκτέλεσης OptEval για ακτίνα κάλυψης αισθητήρων 150 Hausdorff πραγματικών



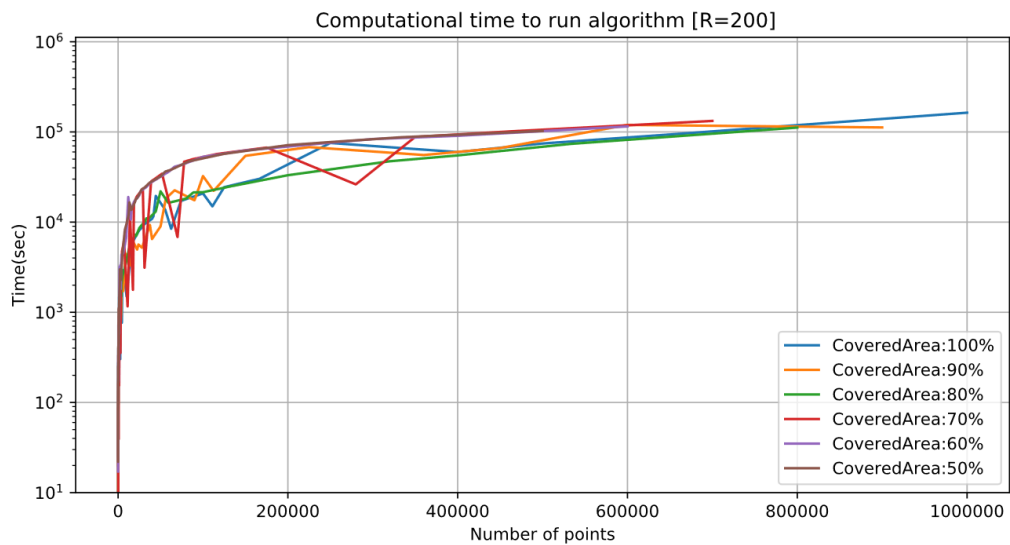
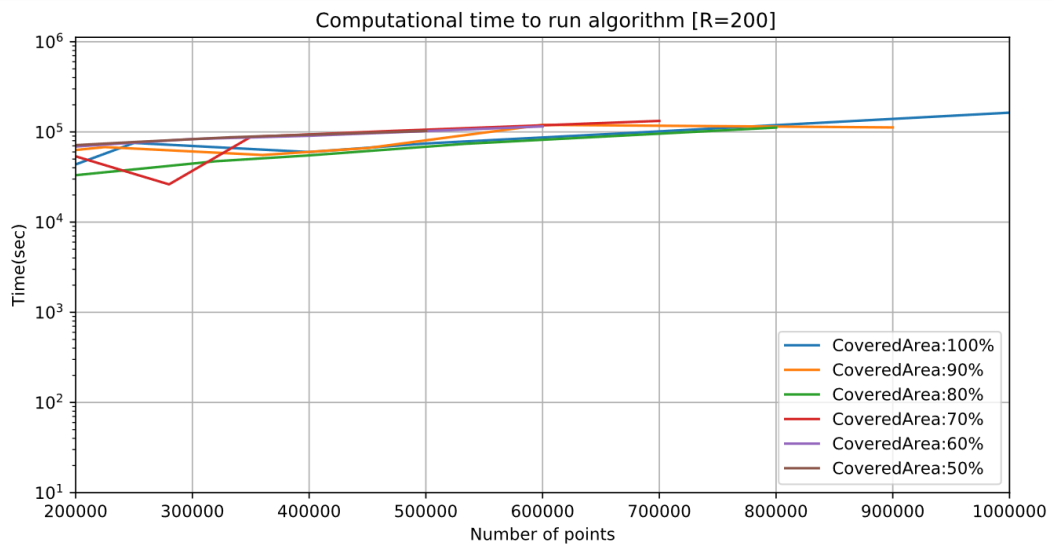
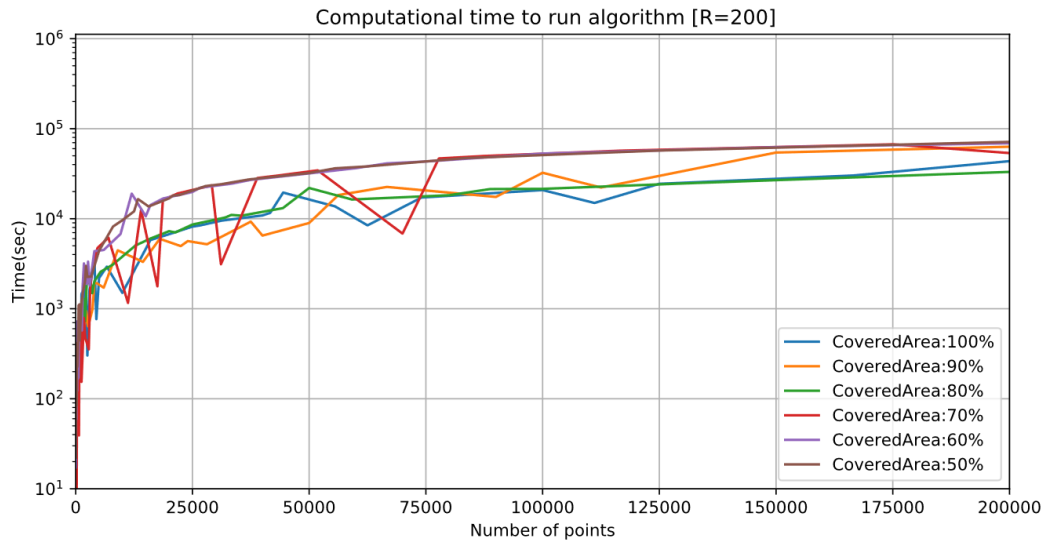
Εικόνα 95: Χρόνος εκτέλεσης OptEval για ακτίνα κάλυψης αισθητήρων 200 Hausdorff πραγματικών



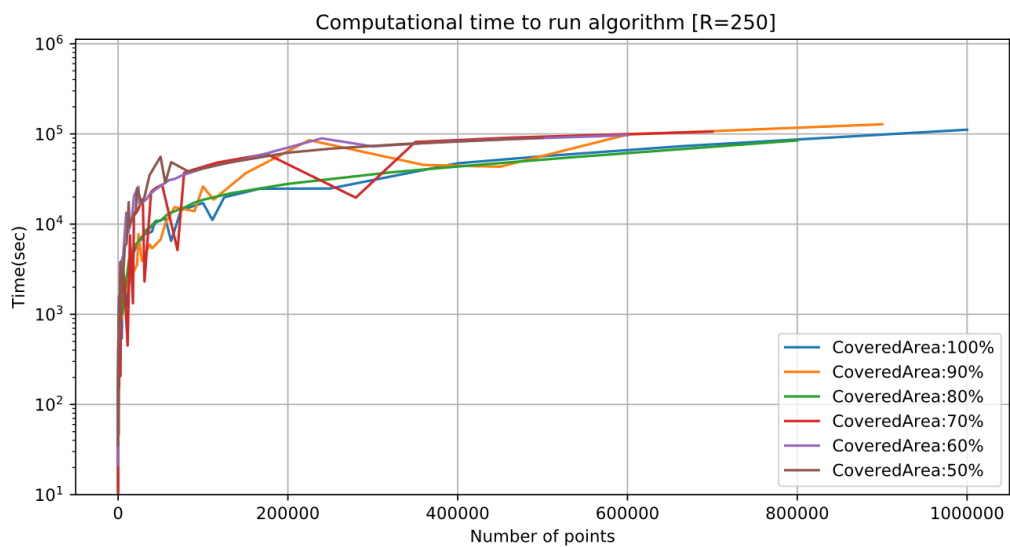
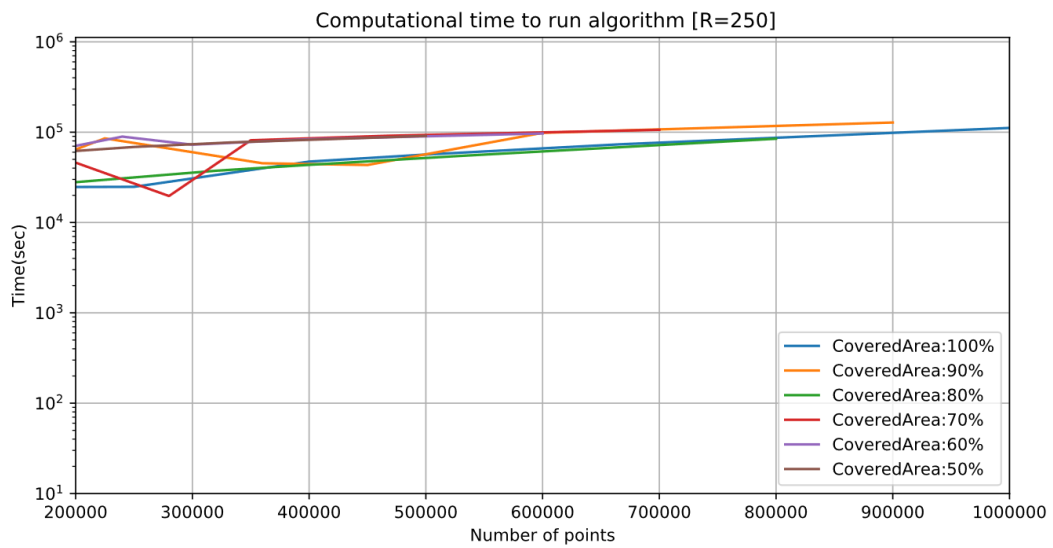
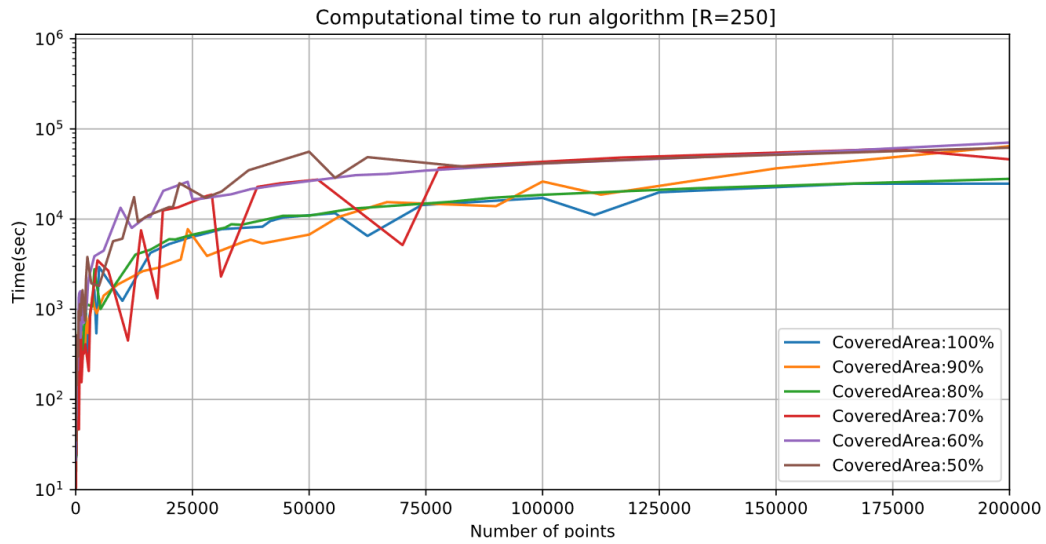
Εικόνα 96: Χρόνος εκτέλεσης OptEval για ακτίνα κάλυψης αισθητήρων 250 Hausdorff πραγματικών



Εικόνα 97: Χρόνος εκτέλεσης OptEval για ακτίνα κάλυψης αισθητήρων 150 Hausdorff θεωρητικών



Εικόνα 98: Χρόνος εκτέλεσης OptEval για ακτίνα κάλυψης αισθητήρων 200 Hausdorff θεωρητικών



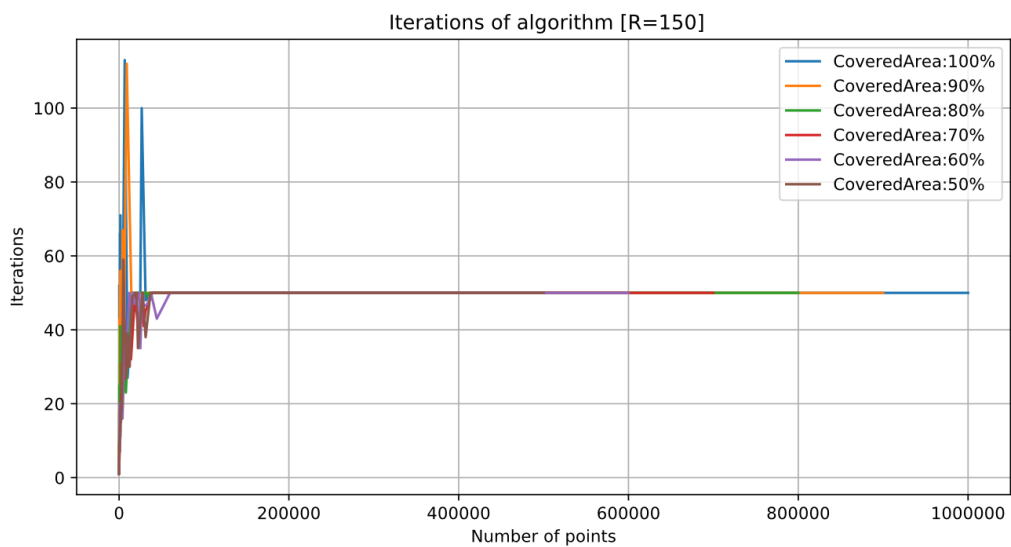
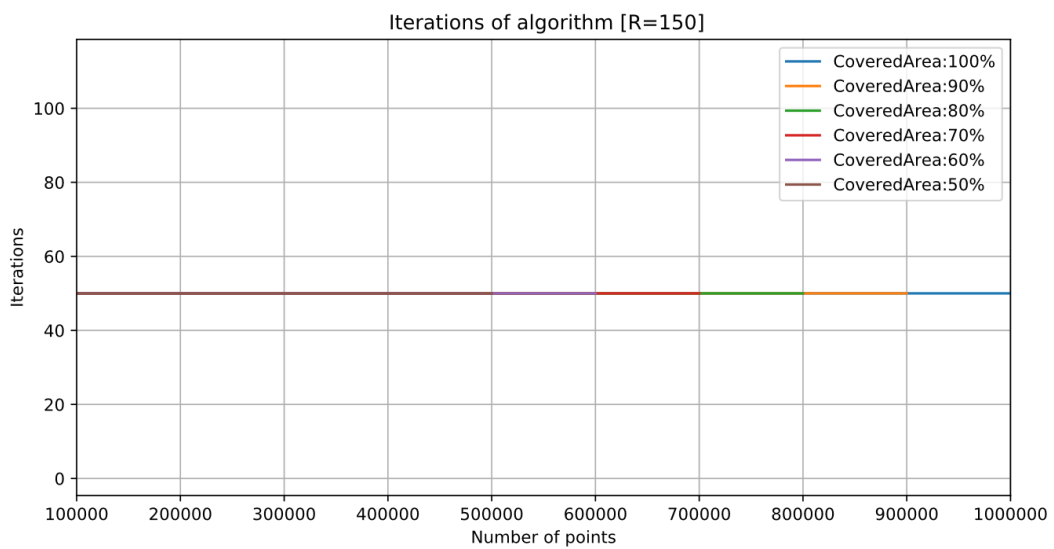
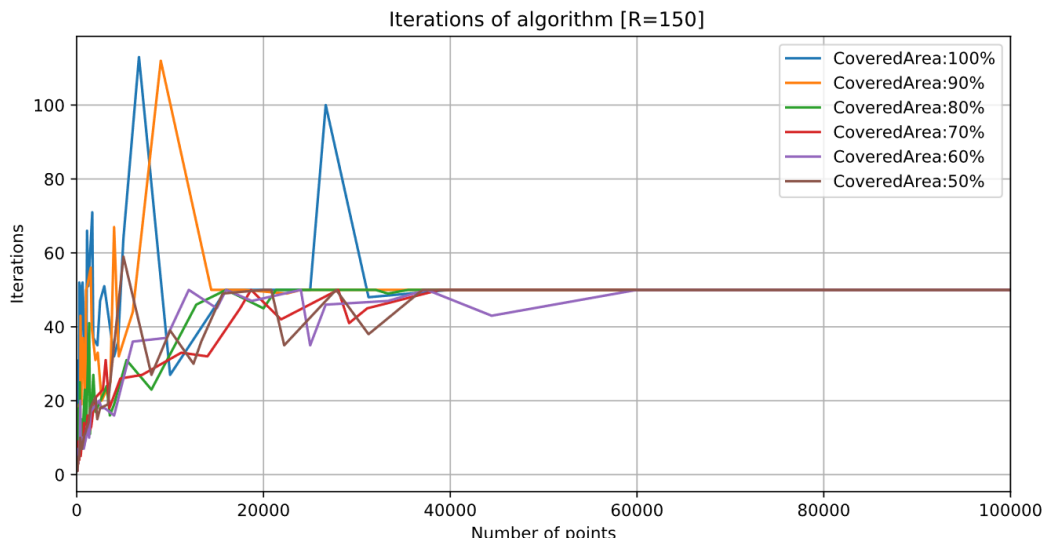
Εικόνα 99: Χρόνος εκτέλεσης OptEval για ακτίνα κάλυψης αισθητήρων 250 Hausdorff θεωρητικών

Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω διαγράμματα ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου δεν αλλάζει αισθητά ανάλογα με το αν η μετρική Hausdorff υπολογισμένη πάνω στα πραγματικά σημεία εγκατάστασης ή πάνω στα θεωρητικά. Αυτό σημαίνει πως οι δύο παρόμοιες εκτελέσεις πρακτικά δεν οδηγούν σε σημαντικό πλήθος παραπάνω εκτελέσεων του λογισμικού OptEval για μεγάλο πλήθος τυχαίων σημείων. Εστιάζοντας όμως στα σενάρια με το πλήθος των σημείων να είναι μικρό, κάτω από 75000 βλέπουμε πως αυτή η διαφορά οδηγεί σε σημαντικές διαφορές ως προς το χρόνο εκτέλεσης. Να σημειωθεί πως τα διαγράμματα είναι σε λογαριθμική κλίμακα ως προς το χρόνο, κάτι που δεν κάνει εμφανές με μια ματιά τον παραπάνω ισχυρισμό.

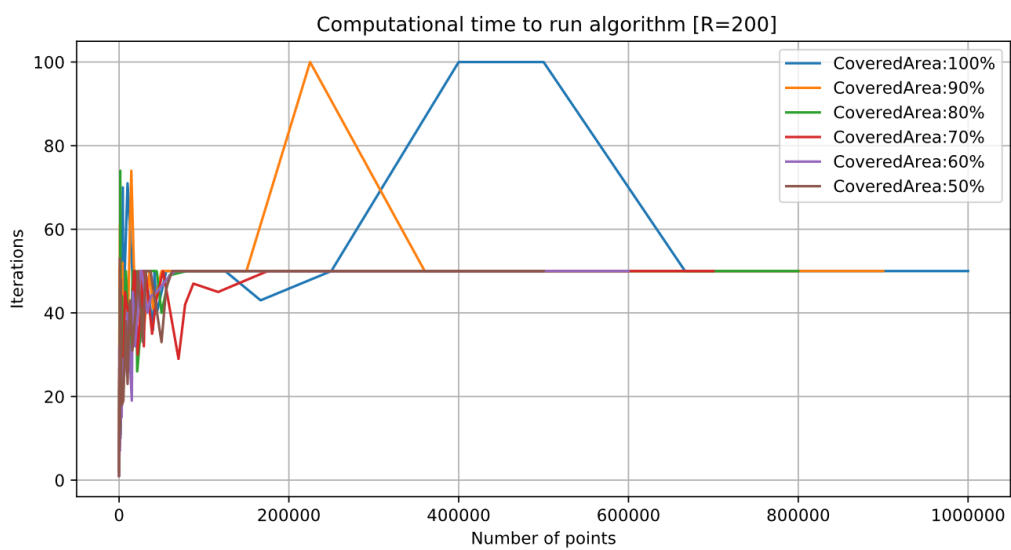
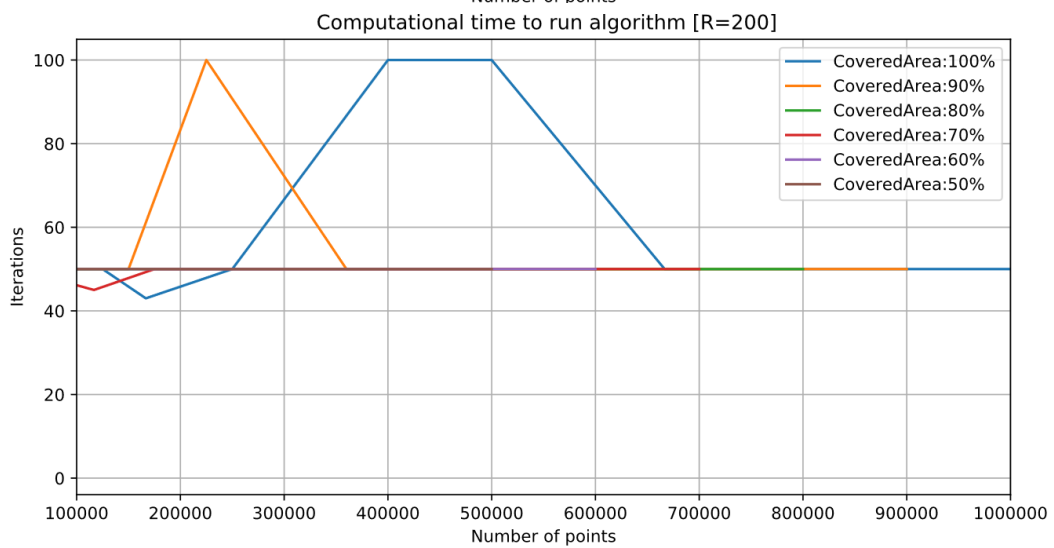
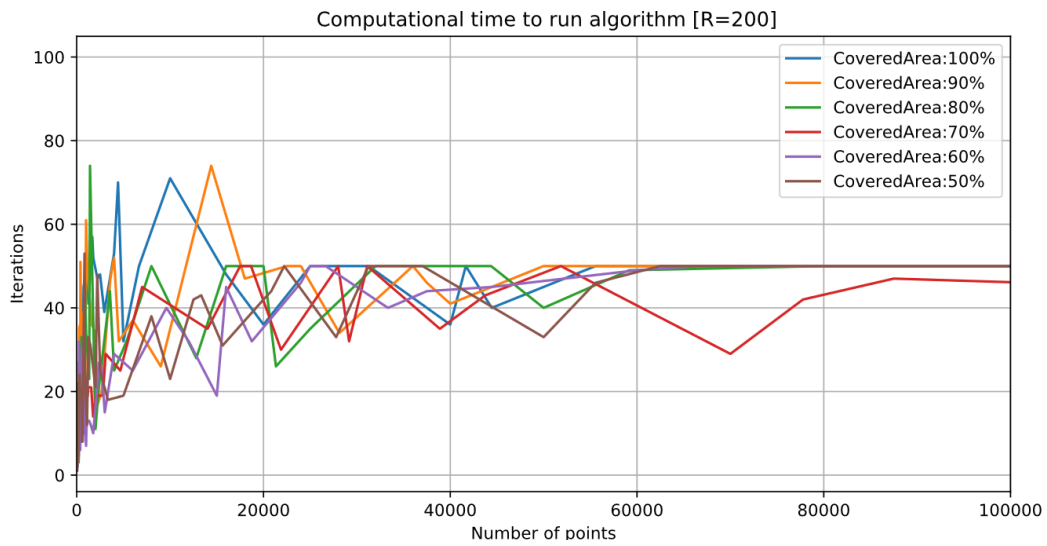
#### 4.6.2.4 Επαναλήψεις των διαδικασιών του OptEval για δεδομένη ακτίνα αισθητήρων

Στις δύο αυτές ομάδες διαγραμμάτων ανήκουν διαγράμματα με τις επαναλήψεις των διαδικασιών του λογισμικού OptEval για κάθε ακτίνα του διαστήματος [150,200,250] για όλα τα σενάρια τυχαίων σημείων. Σύνολο 18 διαγράμματα 9 για κάθε ομάδα. Για κάθε ακτίνα σπάμε τα διαγράμματα στα εύρη [0,100000],[100000,1000000],[0,1000000]. Η πρώτη ομάδα αφορά εκτελέσεις του λογισμικού με την μετρική Hausdorff υπολογισμένη πάνω στα πραγματικά σημεία εγκατάστασης, ενώ η δεύτερη πάνω στα θεωρητικά. Τα πρώτα 9 διαγράμματα αφορούν την πρώτη ομάδα και τα υπόλοιπα την δεύτερη.

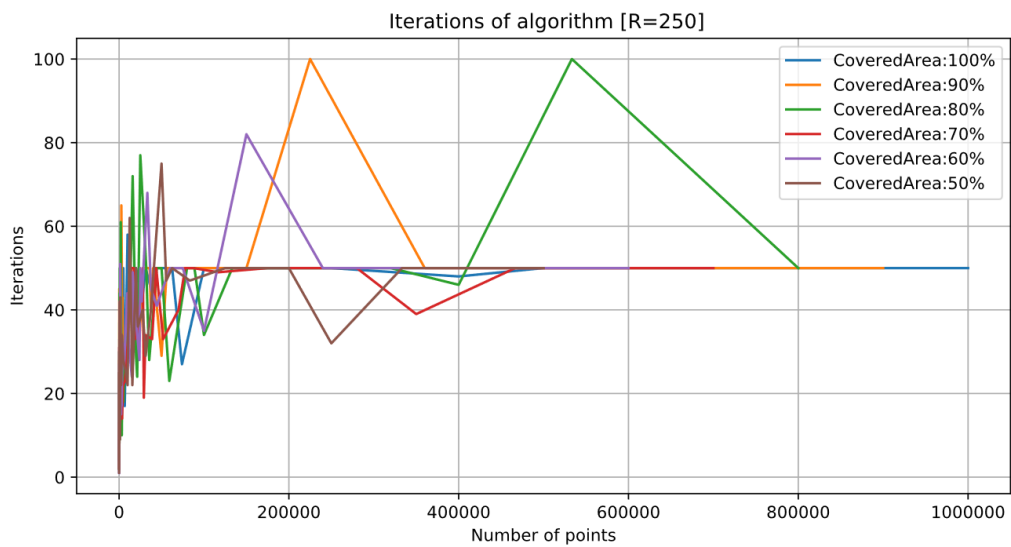
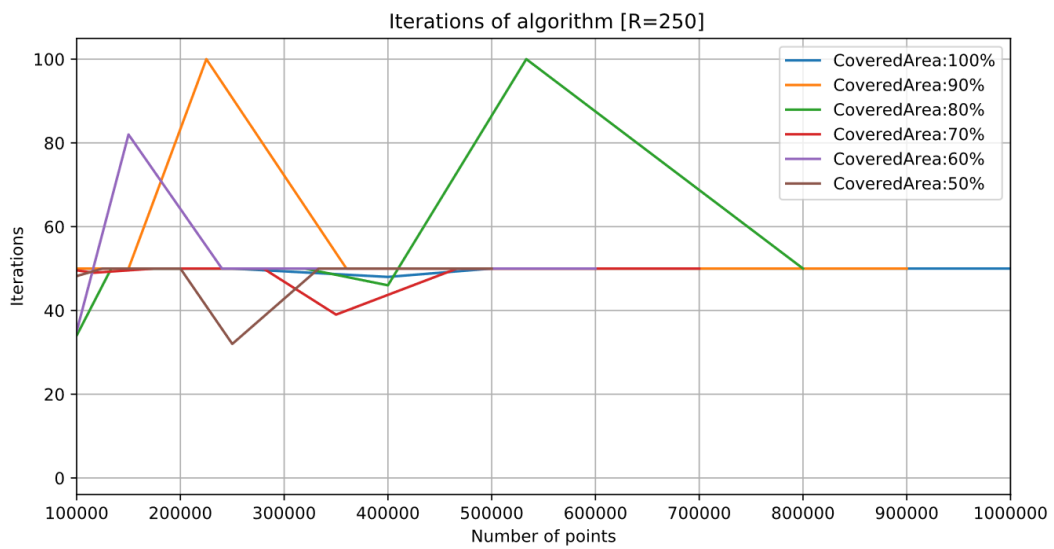
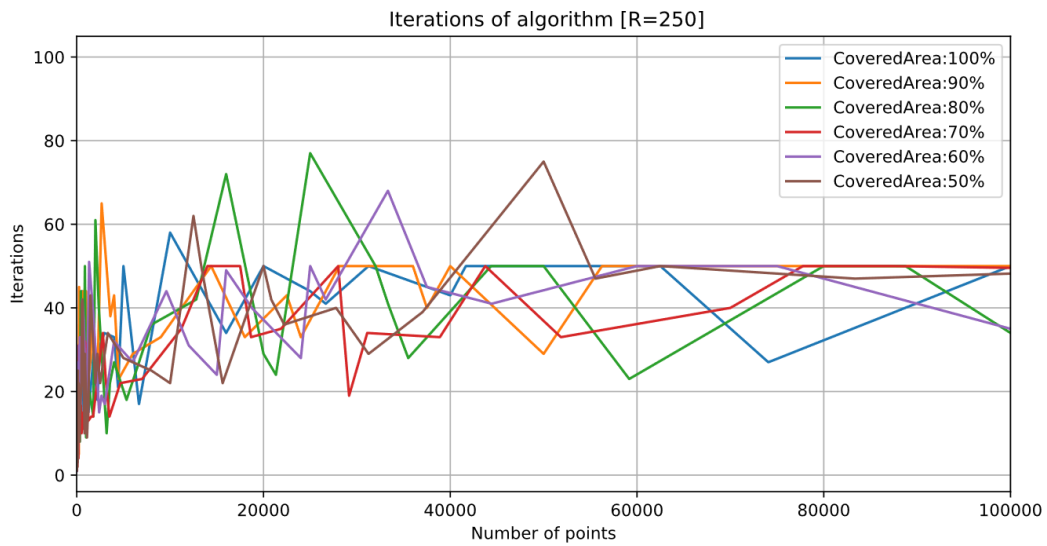




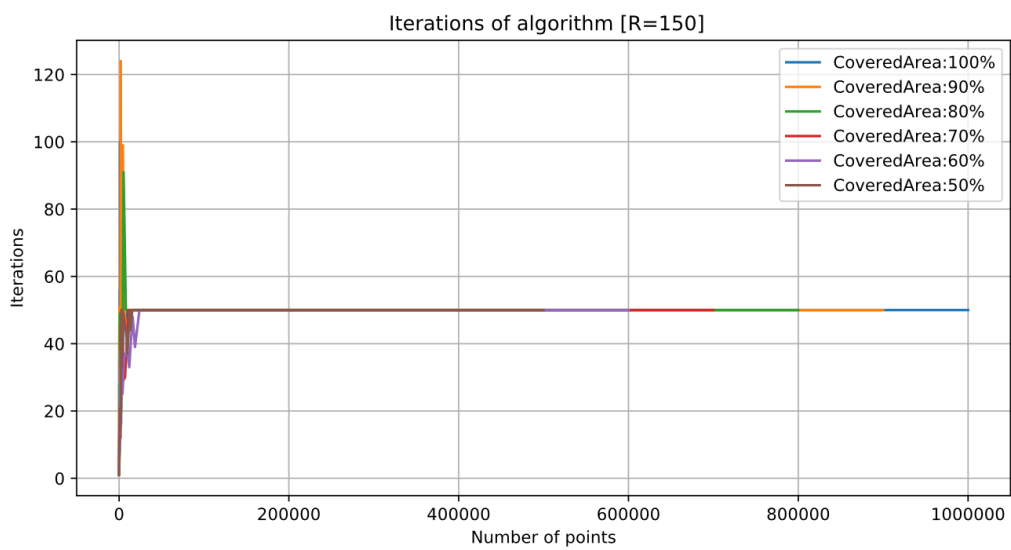
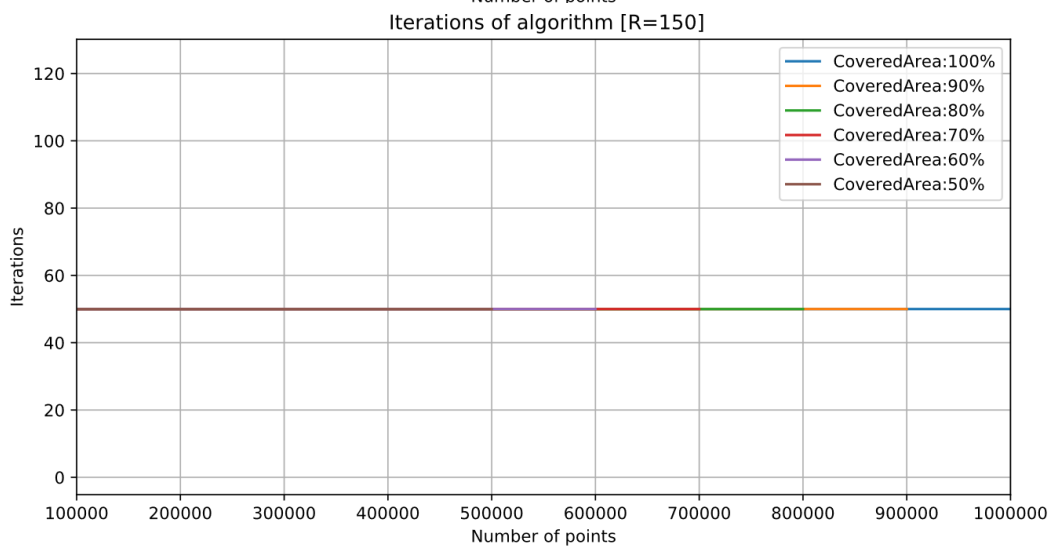
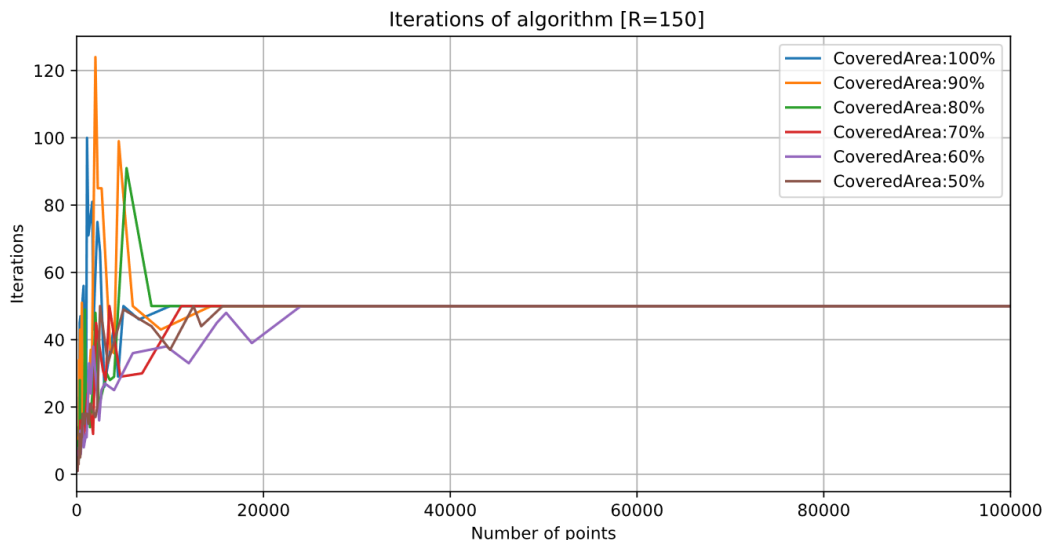
Εικόνα 100: Επαναλήψεις διαδικασιών OptEval για ακτίνα κάλυψης αισθητήρων 150 Hausdorff πραγματικών



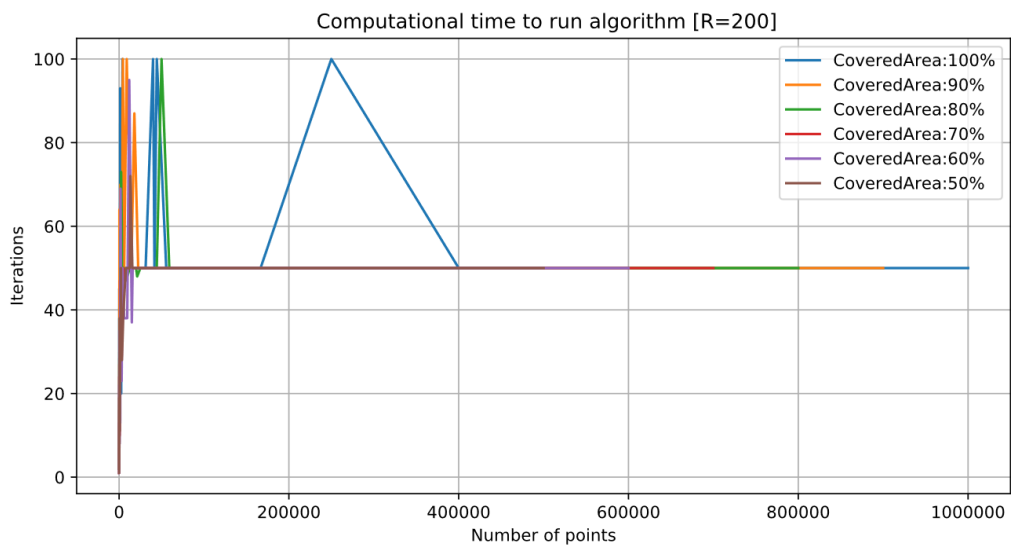
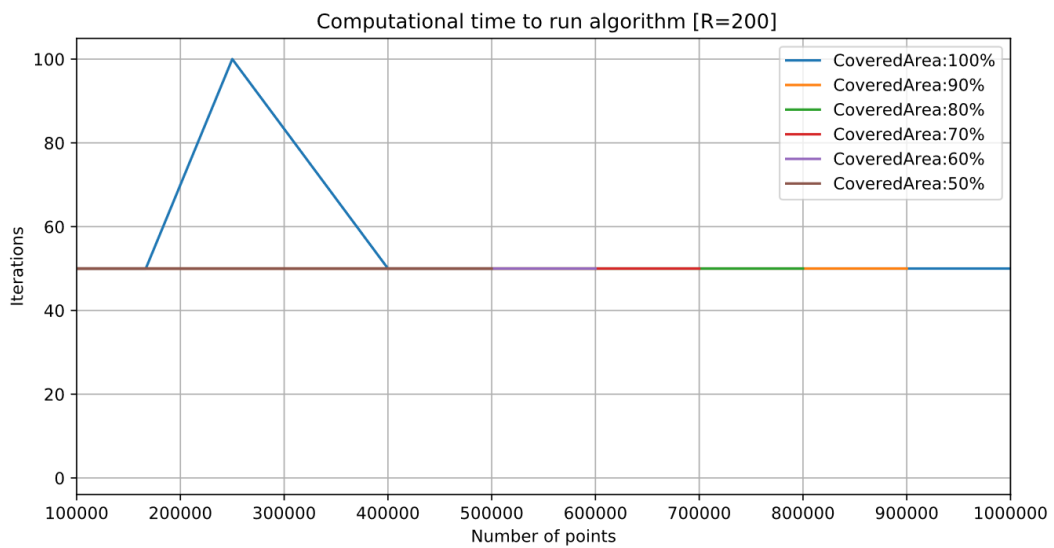
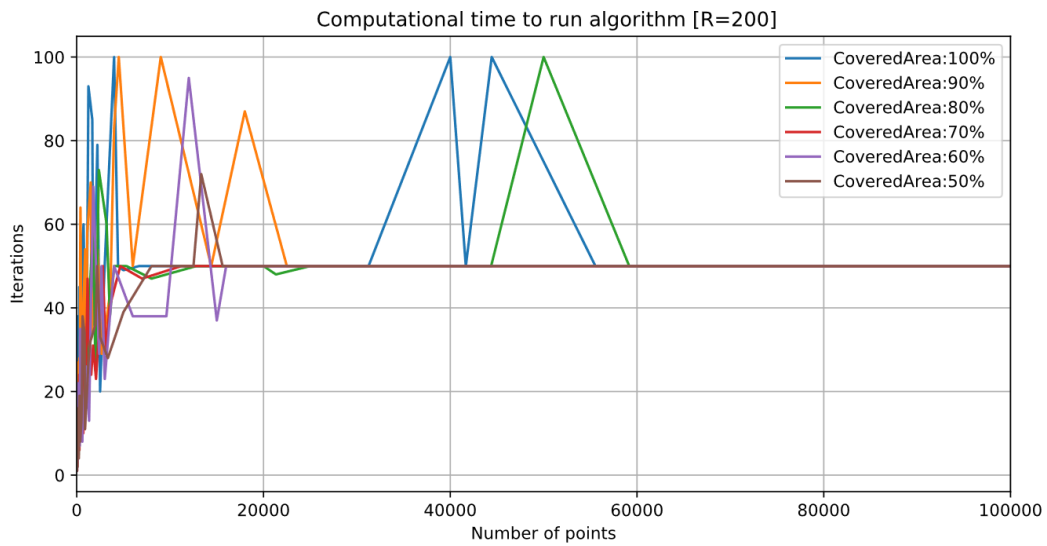
Εικόνα 101: Επαναλήψεις διαδικασιών OptEval για ακτίνα κάλυψης αισθητήρων 200 Hausdorff πραγματικών



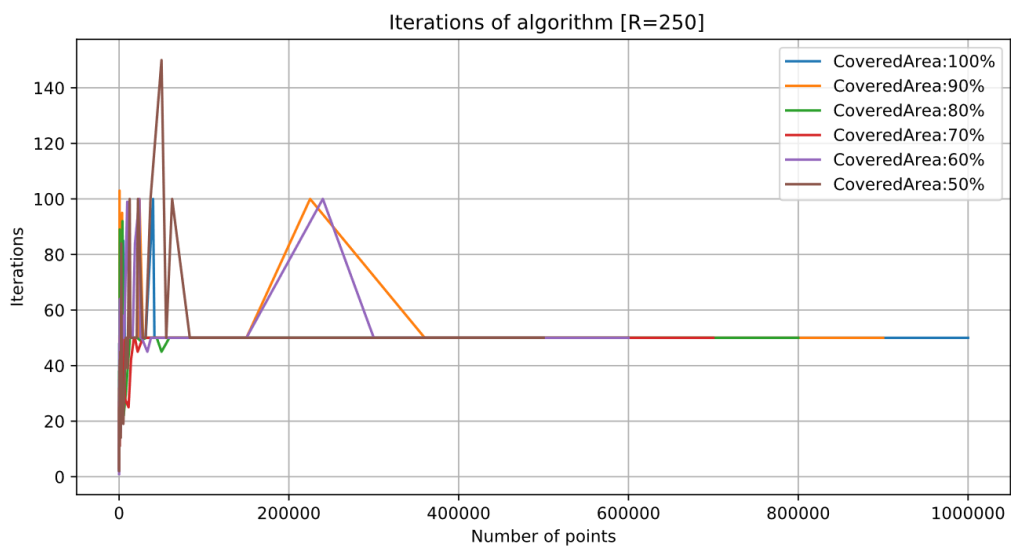
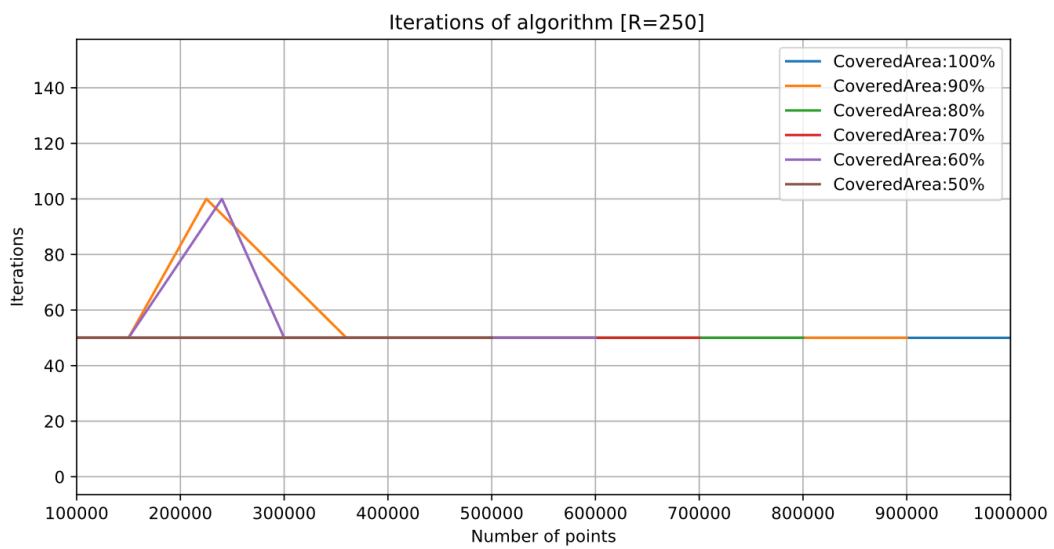
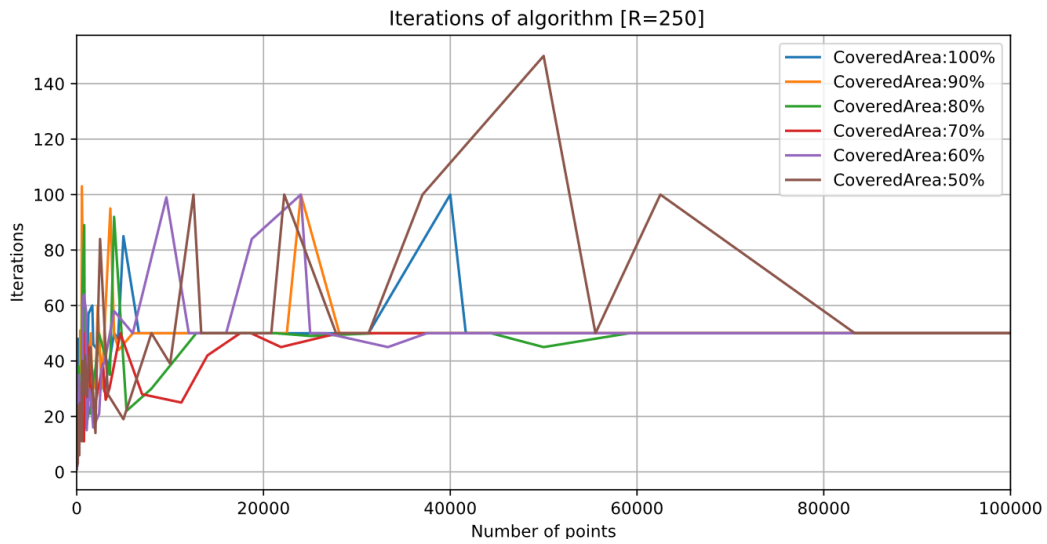
Εικόνα 102: Επαναλήψεις διαδικασιών OptEval για ακτίνα κάλυψης αισθητήρων 250 Hausdorff πραγματικών



Εικόνα 103: Επαναλήψεις διαδικασιών OptEval για ακτίνα κάλυψης αισθητήρων 150 Hausdorff θεωρητικών



Εικόνα 104: Επαναλήψεις διαδικασιών OptEval για ακτίνα κάλυψης αισθητήρων 200 Hausdorff θεωρητικών



Εικόνα 105: Επαναλήψεις διαδικασιών OptEval για ακτίνα κάλυψης αισθητήρων 250 Hausdorff θεωρητικών

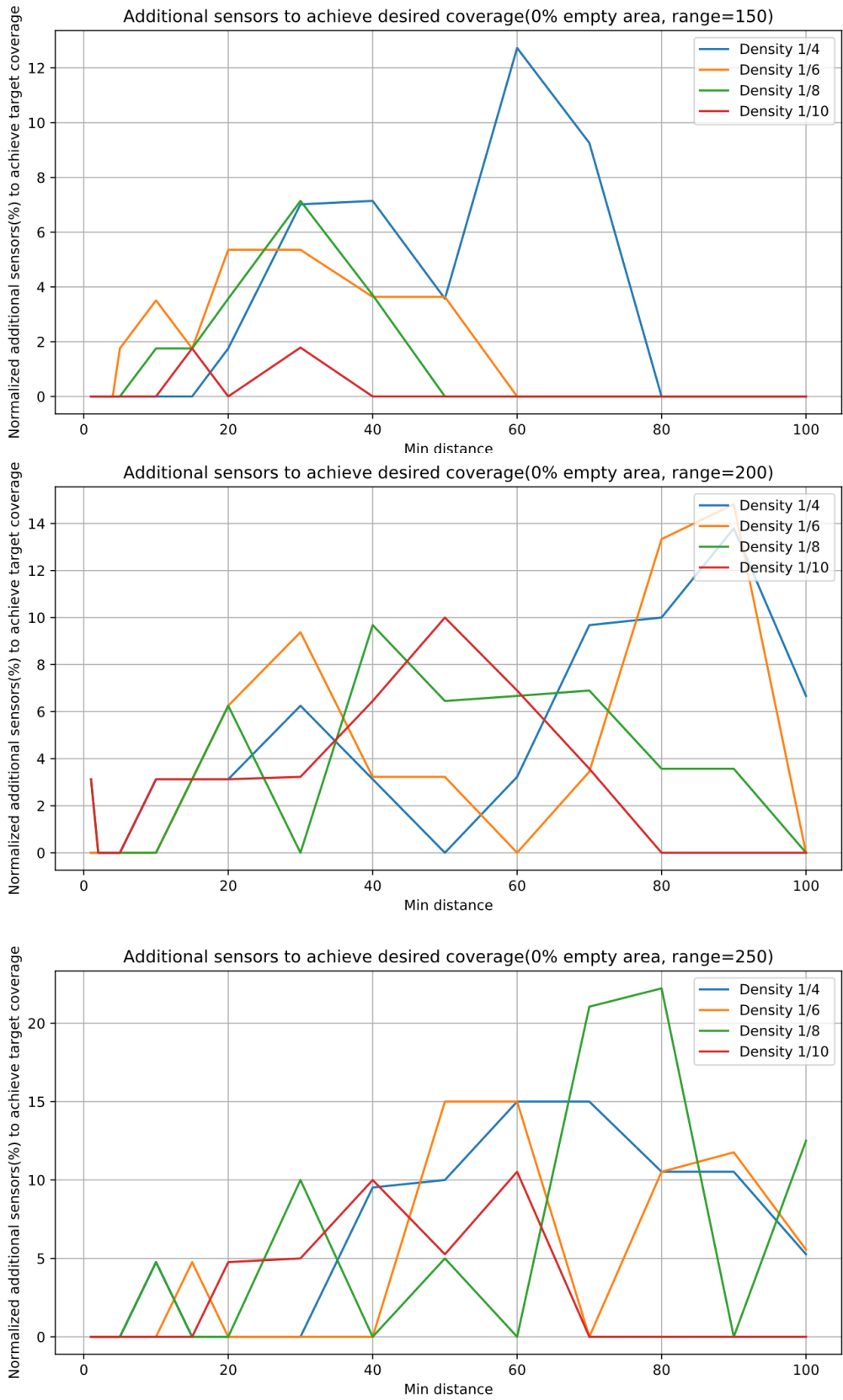
Σε αυτά τα διαγράμματα γίνεται αντιληπτό πως για μεγάλο πλήθος σημείων το πλήθος των επαναλήψεων είναι σταθερό και ίσο με 50, ή 100. Αυτό οφείλεται στην παρατηρούμενη αδυναμία της Hausdorff να συγκλίνει σε λιγότερες από 50 επαναλήψεις που οδηγεί σε τερματισμό της επαναληπτικής διαδικασίας και ελέγχου για ικανοποιητική κάλυψη. Σε περίπτωση ποσοστού κάλυψης πάνω από 90% η διαδικασία σταματάει, ενώ όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω στην αντίθετη περίπτωση, αυξάνεται το πλήθος των αισθητήρων και μετά από άλλες 50 επαναλήψεις τερματίζει οριστικά ο αλγόριθμος. Ουσιαστικά, παρατηρούμε πως όσο αυξάνεται η πυκνότητα και το πλήθος των σημείων, τότε χρειάζεται ο ελάχιστος αριθμός αισθητήρων για να πετύχουμε την επιθυμητή κάλυψη.

Εστιάζοντας στα σενάρια με λίγα σημεία τοποθέτησης και σχετικά αραιά, παρατηρείται πως η μετρική Hausdorff συγκλίνει γρήγορα και δεν οδηγείται σε ικανοποιητική κάλυψη αρκετές φορές αυξάνοντας αρκετά το πλήθος αισθητήρων, κάτι που θα γίνει πιο ξεκάθαρο στις επόμενες ομάδες διαγραμμάτων.

Όσον αφορά τις διαφορές μεταξύ των συγκρίσιμων διαγραμμάτων ομάδων  $\Delta R$  και  $\Delta T$  δεν φαίνεται να μπορεί να εξαχθεί κάποιος γενικός κανόνας περιγραφής και σύγκρισής τους.

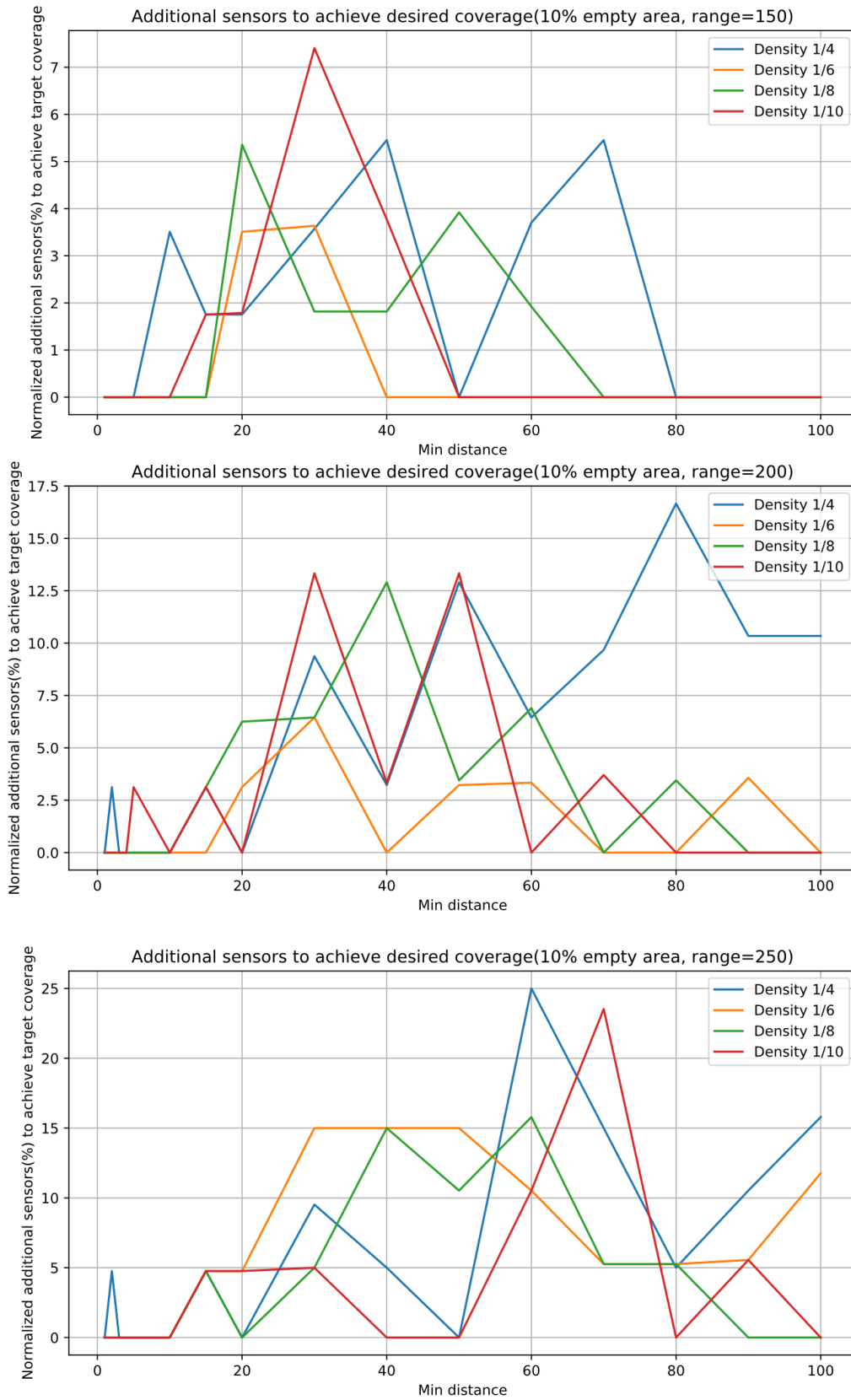
#### 4.6.2.5 Επιπλέον αισθητήρες για την επίτευξη της επιθυμητής κάλυψης για δεδομένη ακτίνα αισθητήρων και ποσοστό νεκρής ζώνης

Στις δύο αυτές ομάδες διαγραμμάτων ανήκουν διαγράμματα με το κανονικοποιημένο ποσοστό παραπάνω αισθητήρων από τον ελάχιστο που απαιτούνται για την επίτευξη της επιθυμητής σε σχέση με την ελάχιστη επιτρεπτή απόσταση μεταξύ δύο τυχαίων σημείων. Έχουμε σύνολο 36 διαγράμματα, 18 για κάθε ομάδα. Το κάθε διάγραμμα αναφέρεται σε μια νεκρή ζώνη [0%,10%,20%,30%,40%,50%] και σε κάποια ακτίνα στο εύρος [150,200,250] Η πρώτη ομάδα αφορά εκτελέσεις του λογισμικού με την μετρική Hausdorff υπολογισμένη πάνω στα πραγματικά σημεία εγκατάστασης, ενώ η δεύτερη πάνω στα θεωρητικά. Τα πρώτα 18 διαγράμματα αφορούν την πρώτη ομάδα και τα υπόλοιπα την δεύτερη.

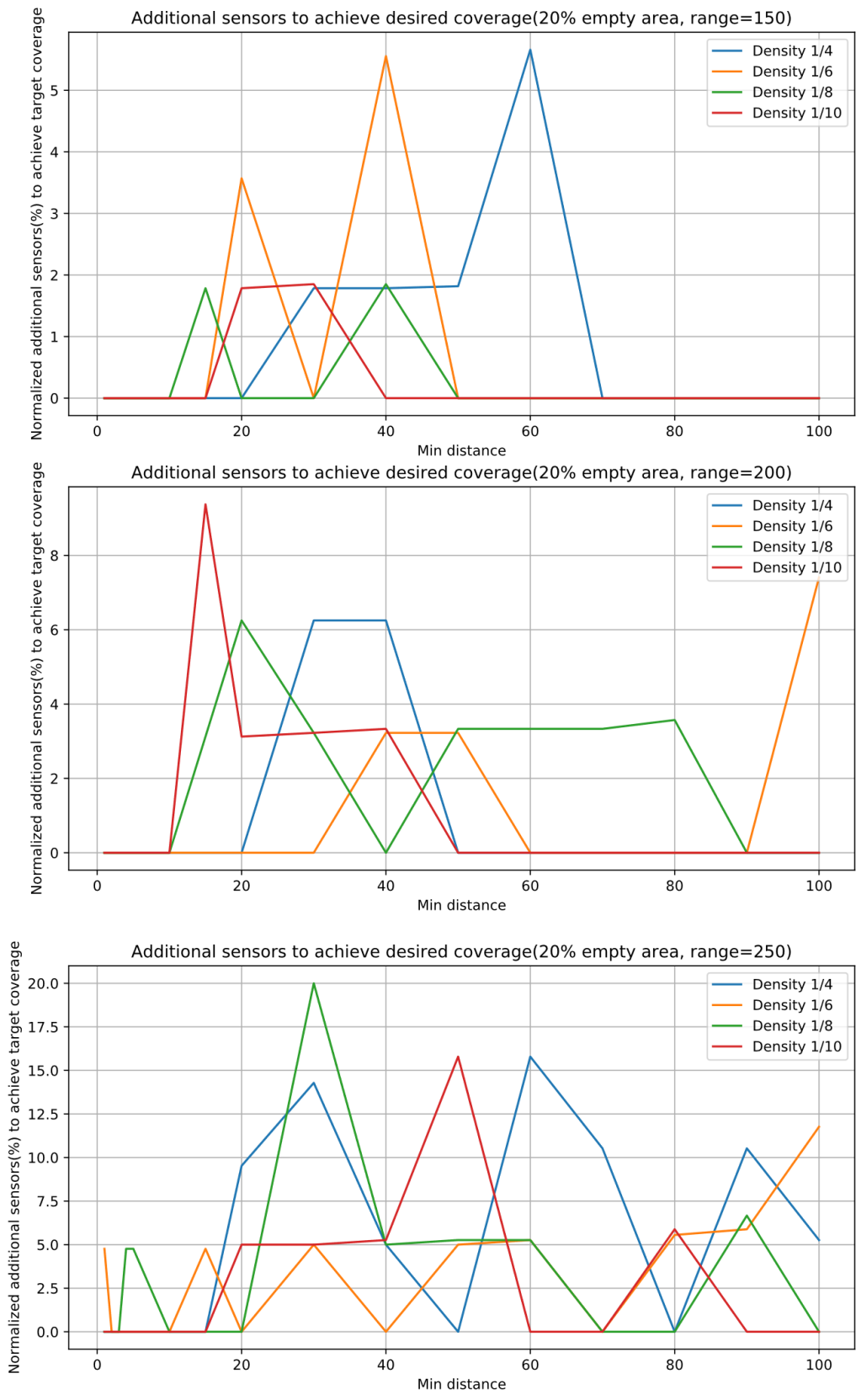


Εικόνα 106: Ποσοστό αύξησης αισθητήρων για επίτευξη ζητούμενης κάλυψης( νεκρή ζώνη 0%, Hausdorff πραγματικών)

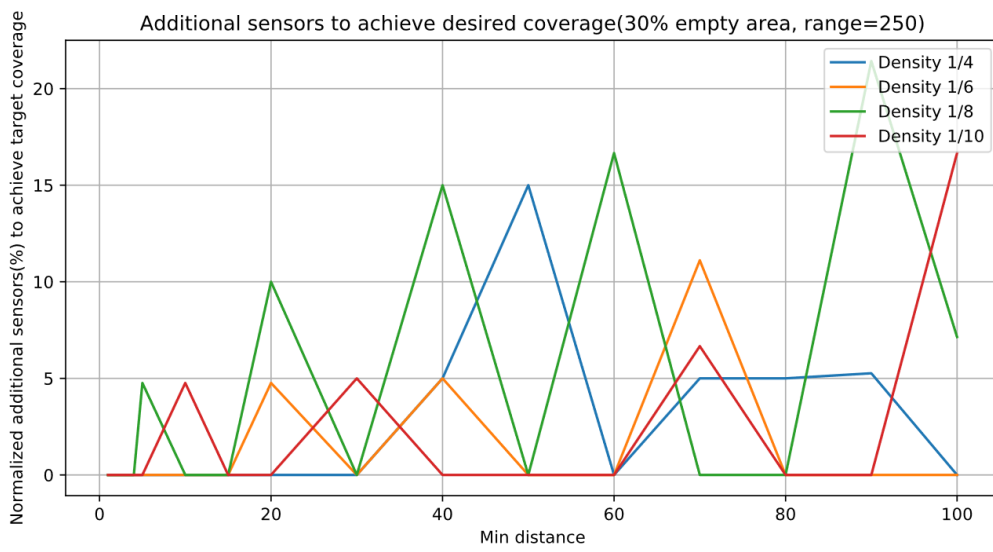
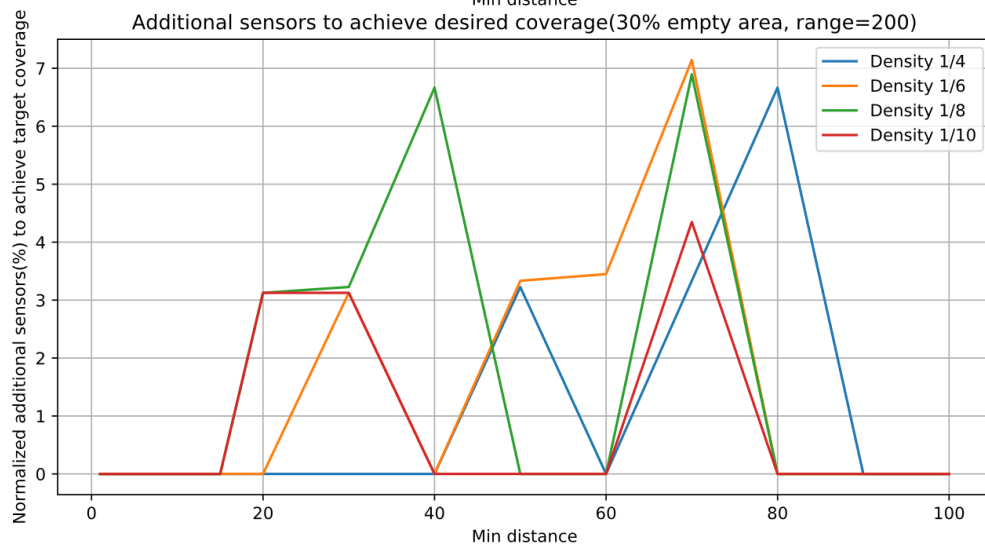
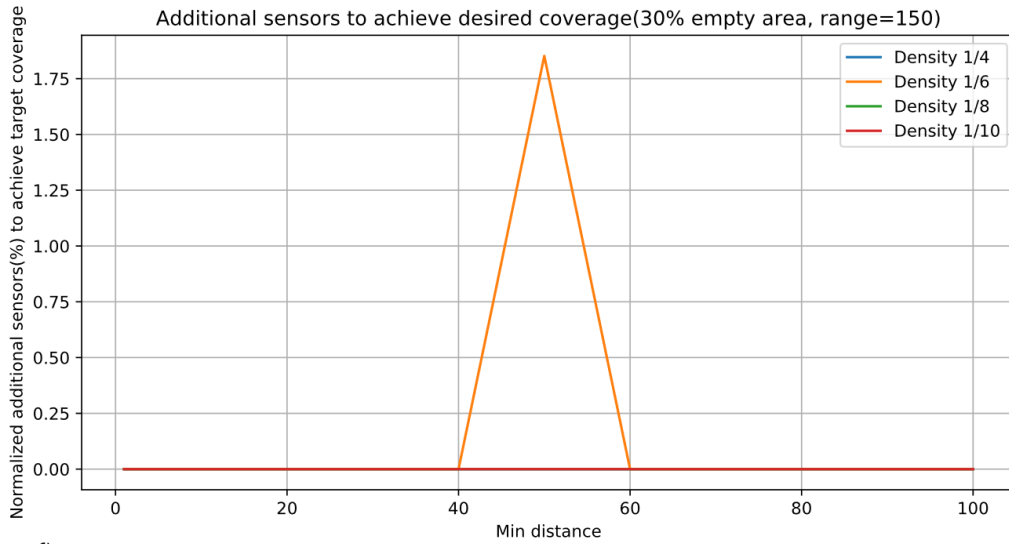




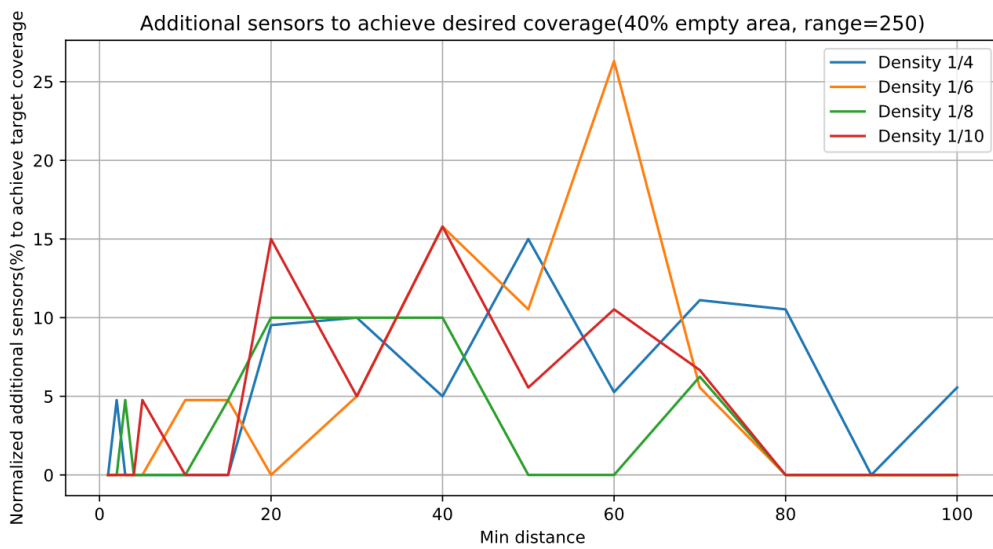
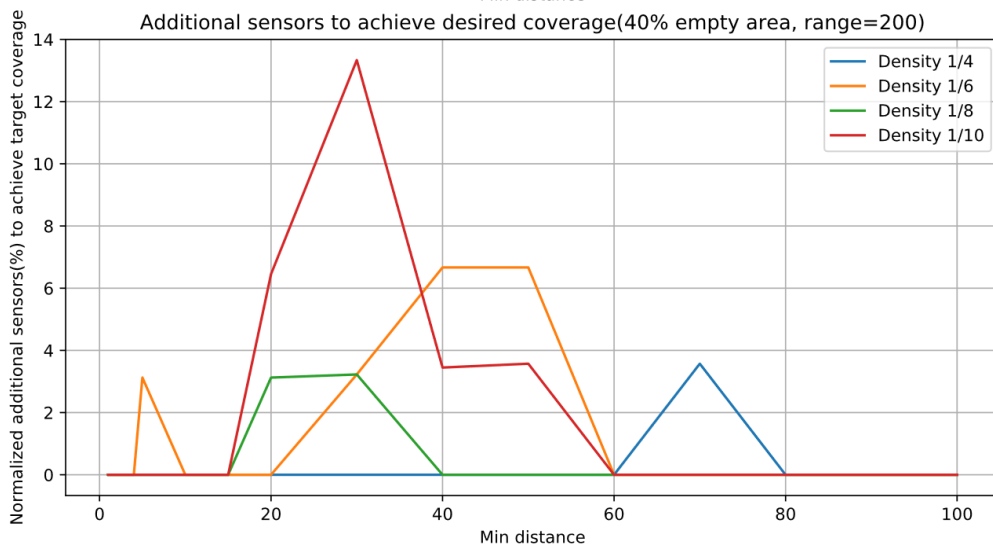
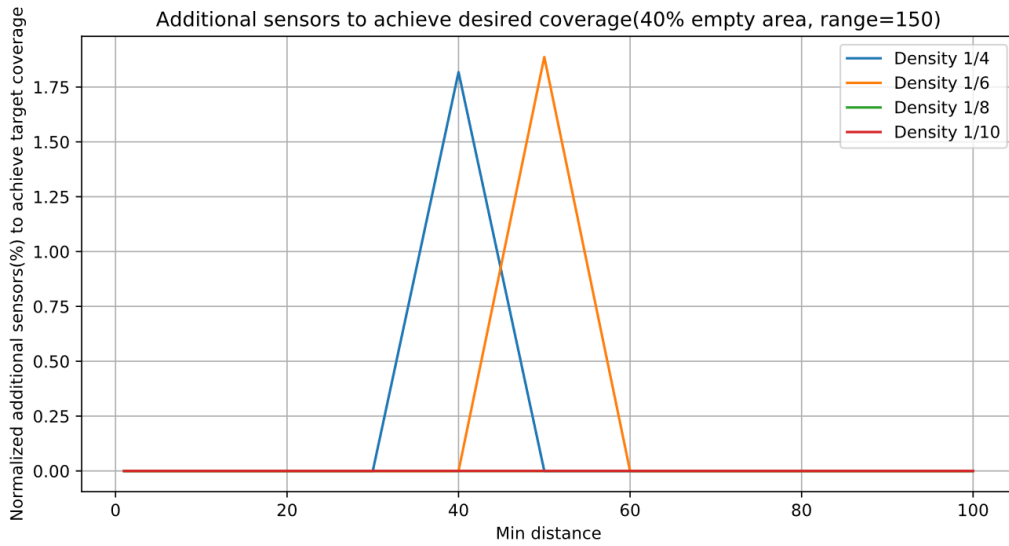
Εικόνα 107: Ποσοστό αύξησης αισθητήρων για επίτευξη ζητούμενης κάλυψης( νεκρή ζώνη 10%, Hausdorff πραγματικών)



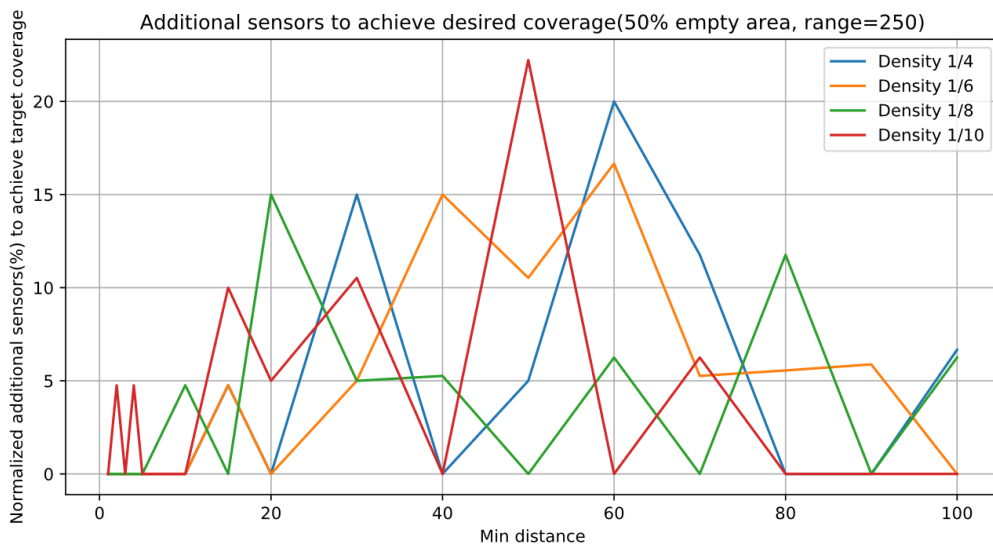
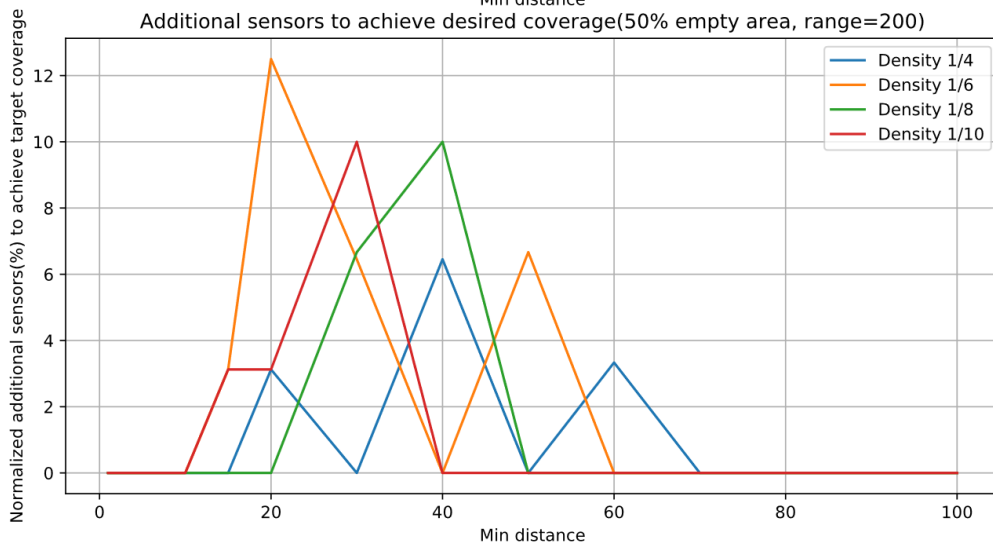
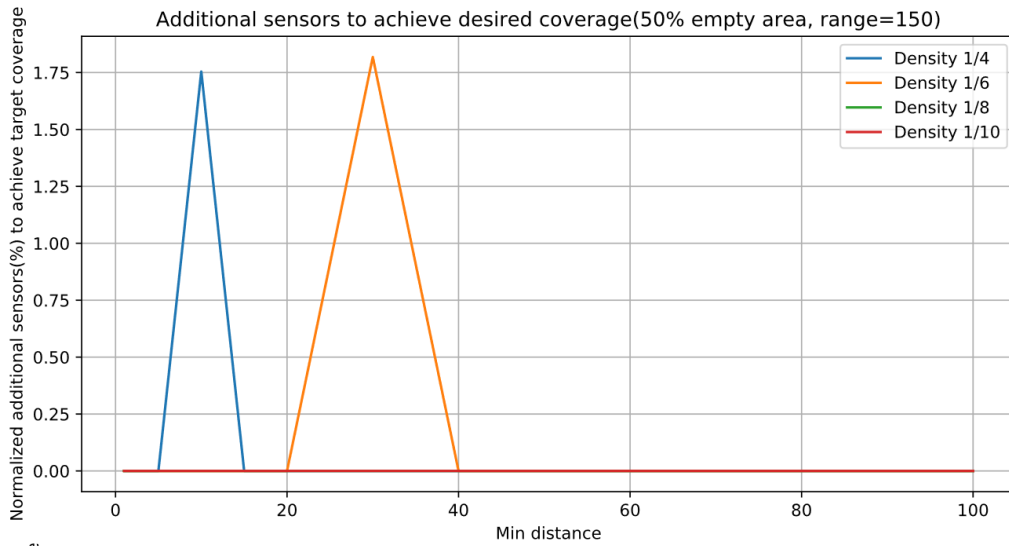
Εικόνα 108: Ποσοστό αύξησης αισθητήρων για επίτευξη ζητούμενης κάλυψης( νεκρή ζώνη 20%, Hausdorff πραγματικών)



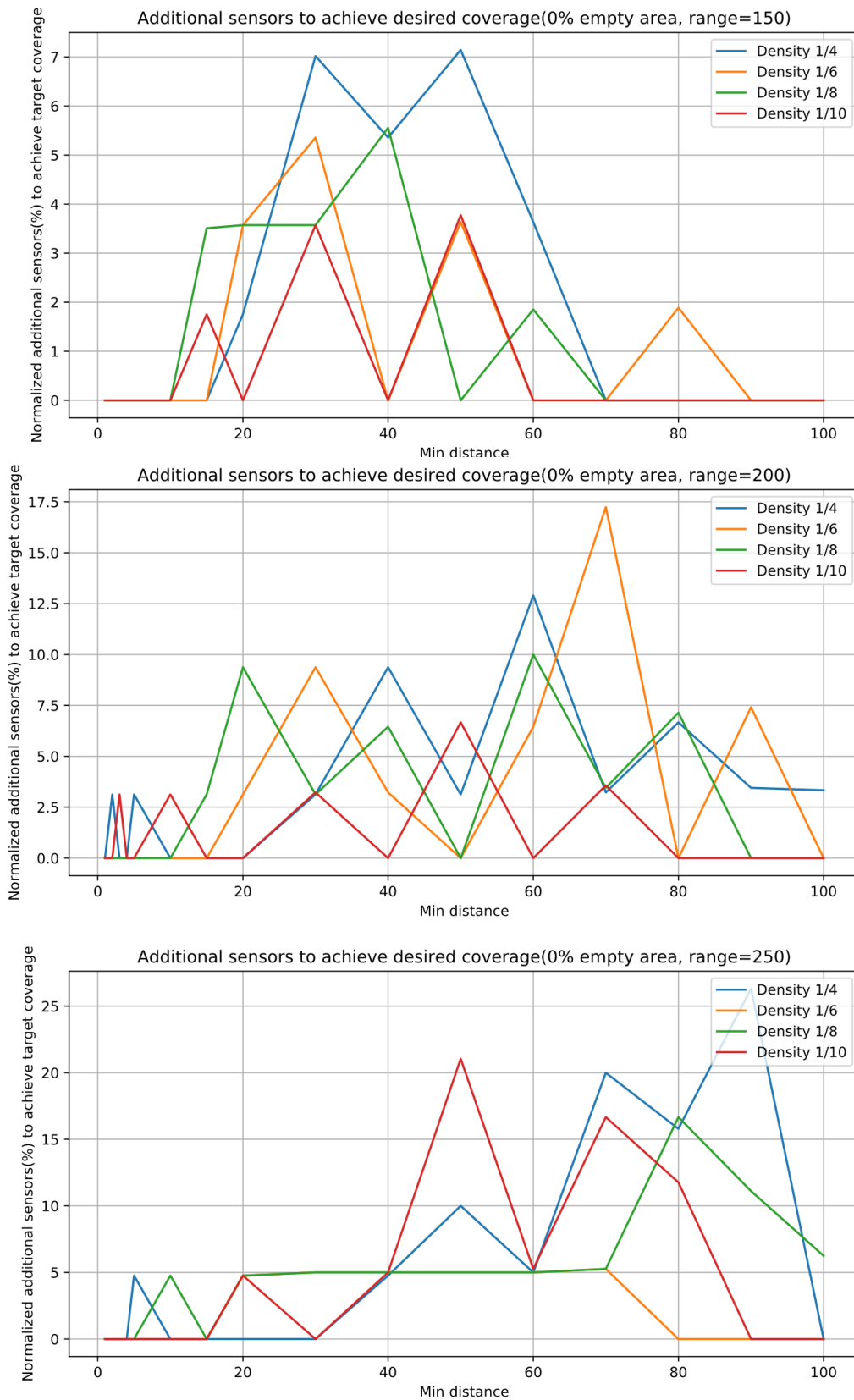
Εικόνα 109: Ποσοστό αύξησης αισθητήρων για επίτευξη ζητούμενης κάλυψης( νεκρή ζώνη 30%, Hausdorff πραγματικών)



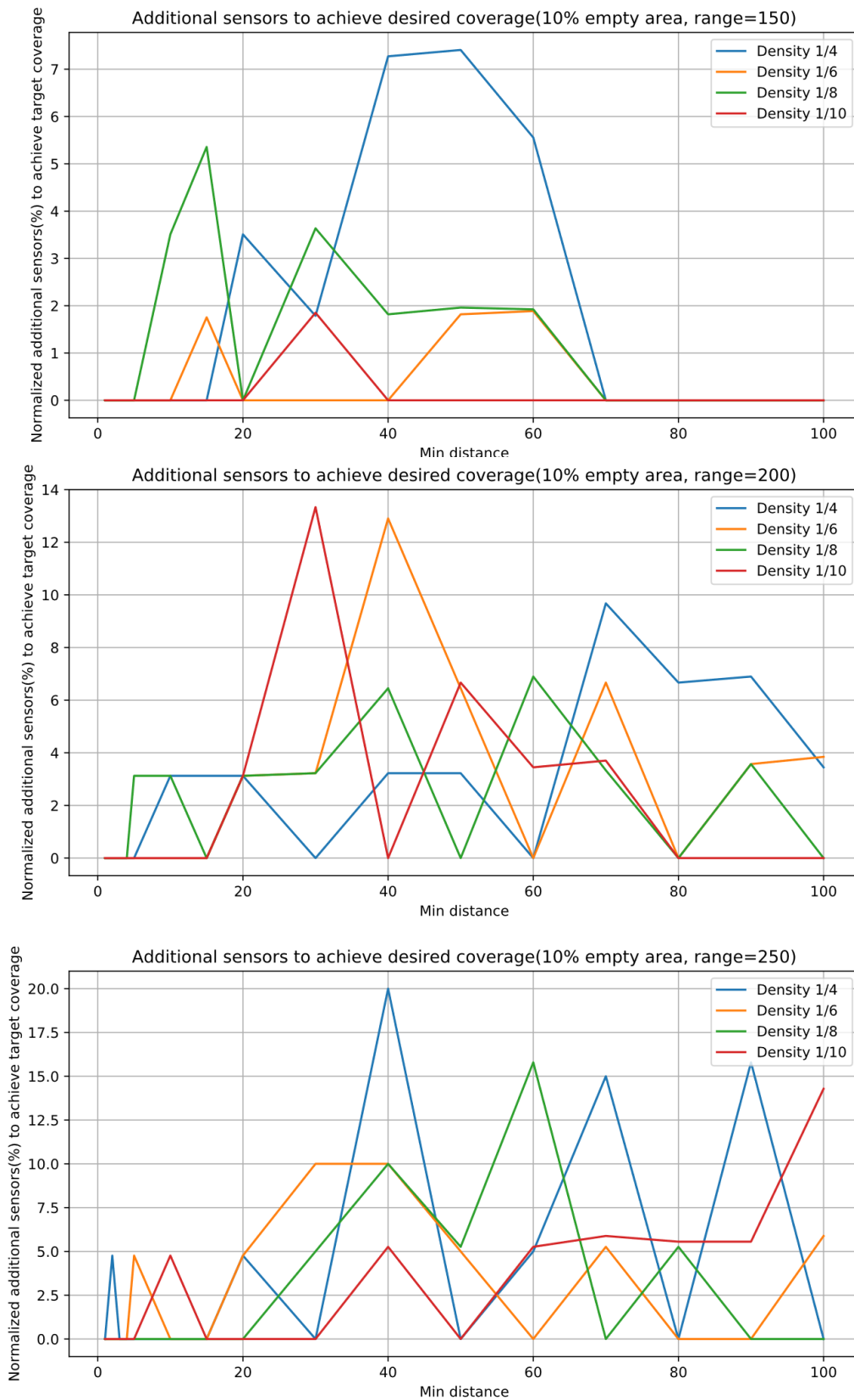
Εικόνα 110: Ποσοστό αύξησης αισθητήρων για επίτευξη ζητούμενης κάλυψης( νεκρή ζώνη 40%, Hausdorff πραγματικών)



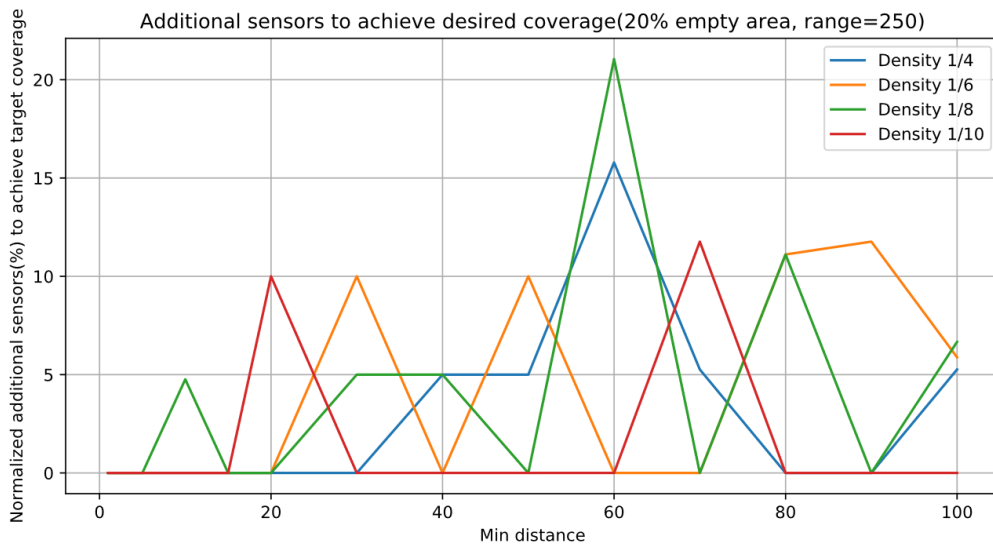
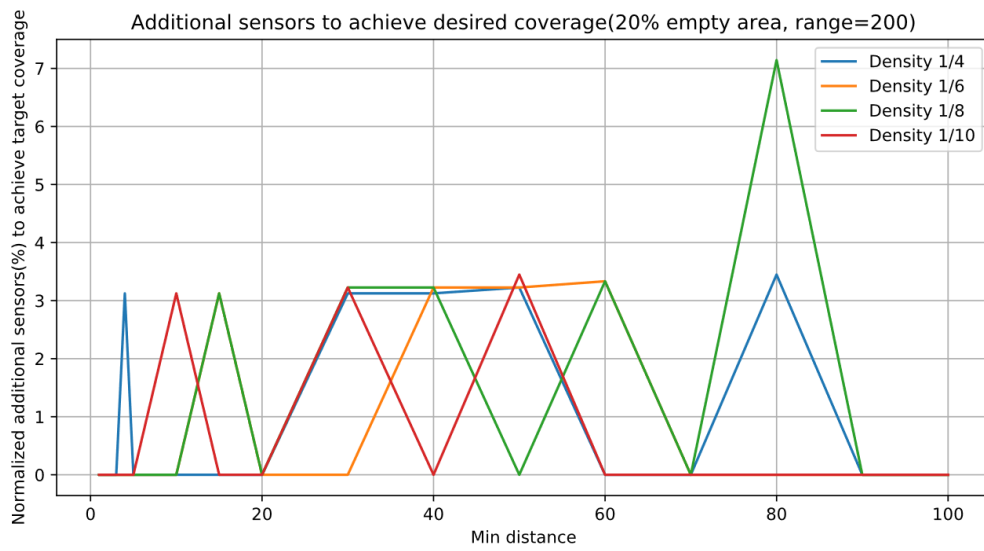
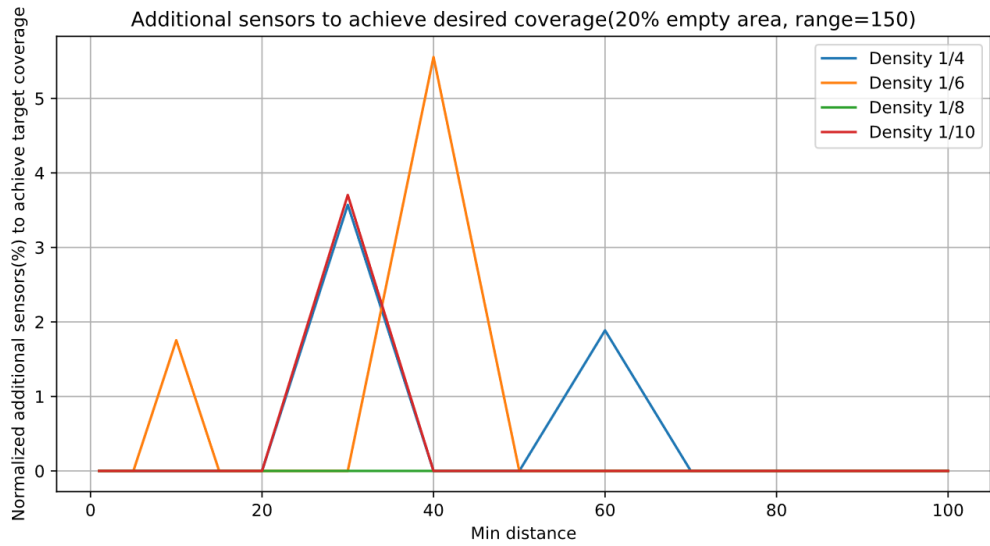
Εικόνα 111: Ποσοστό αύξησης αισθητήρων για επίτευξη ζητούμενης κάλυψης( νεκρή ζώνη 50%, Hausdorff πραγματικών)



Εικόνα 112: Ποσοστό αύξησης αισθητήρων για επίτευξη ζητούμενης κάλυψης (νεκρή ζώνη 0%, Hausdorff θεωρητικών)

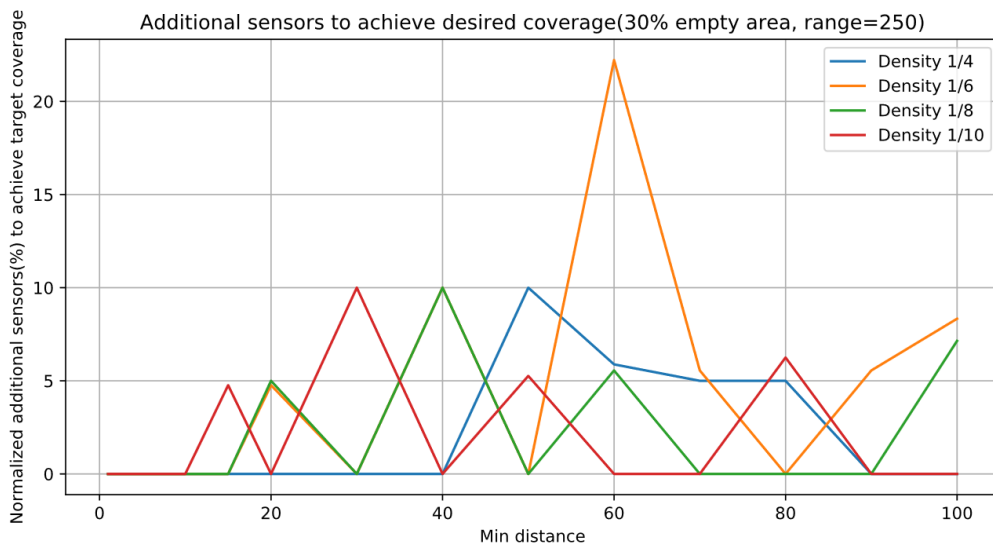
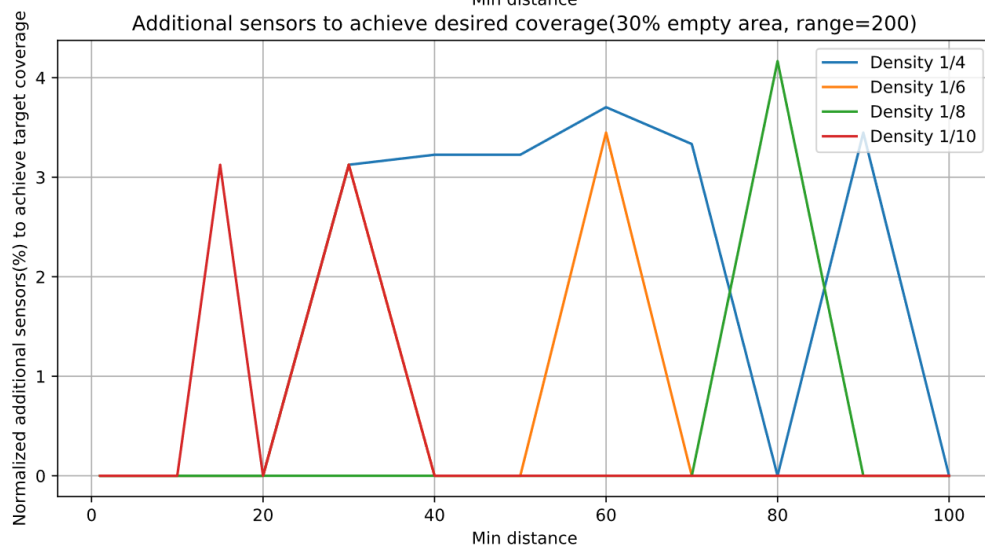
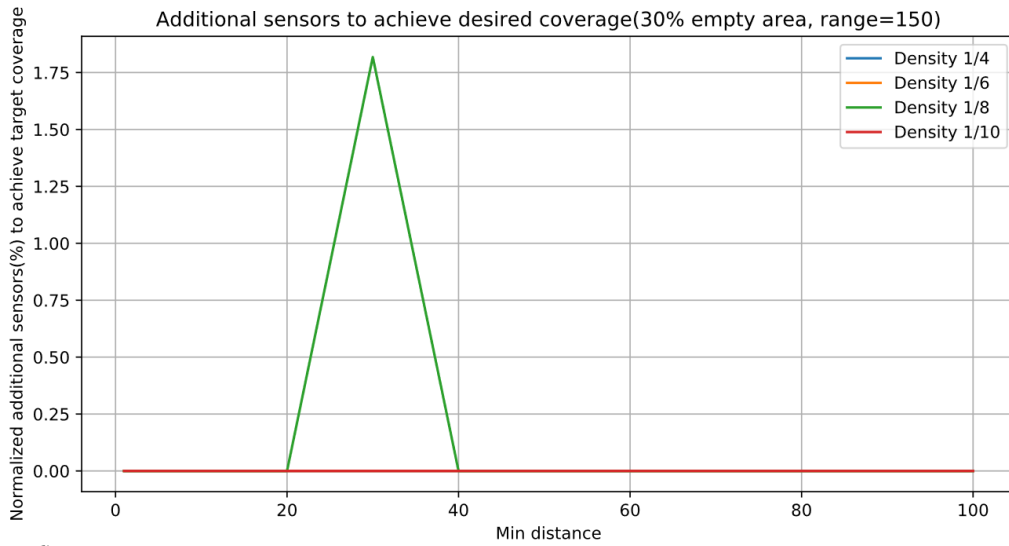


Εικόνα 113: Ποσοστό αύξησης αισθητήρων για επίτευξη ζητούμενης κάλυψης( νεκρή ζώνη 10%, Hausdorff πραγματικών)

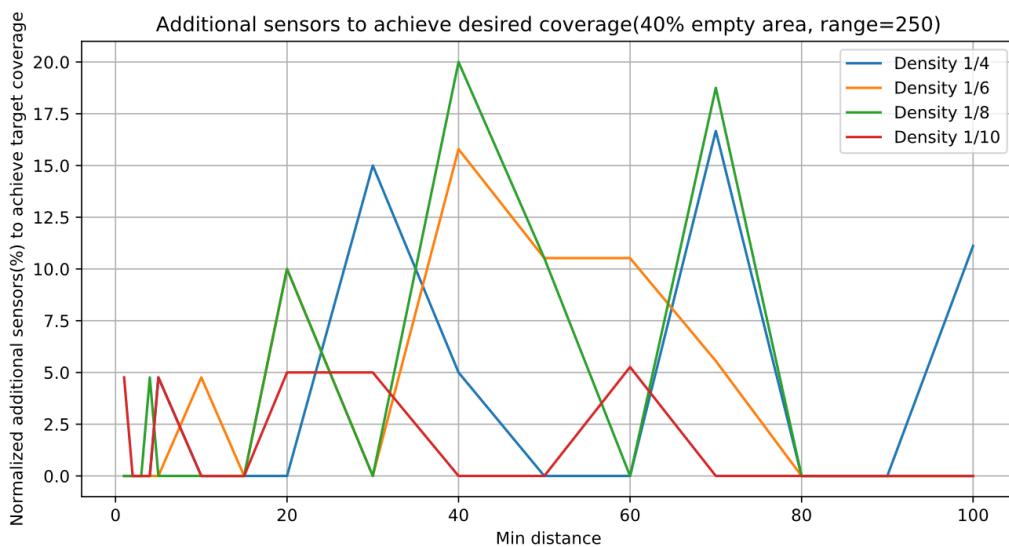
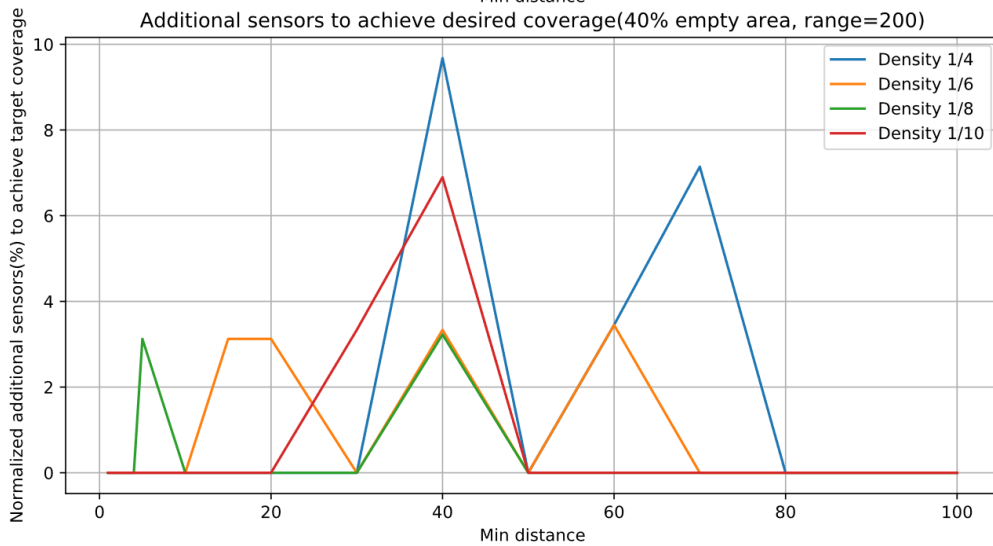
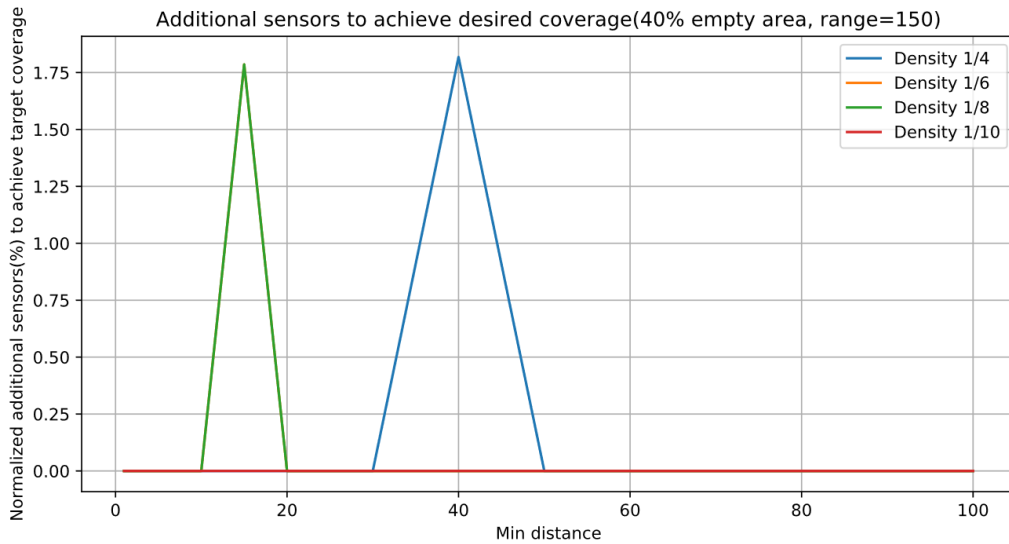


Εικόνα 114: Ποσοστό αύξησης αισθητήρων για επίτευξη ζητούμενης κάλυψης( νεκρή ζώνη 20%, Hausdorff πραγματικών)

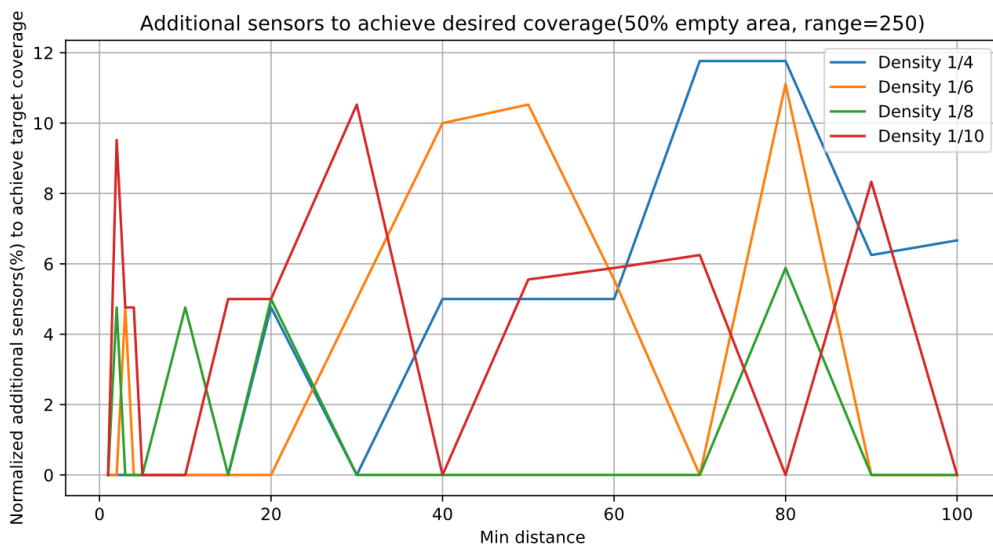
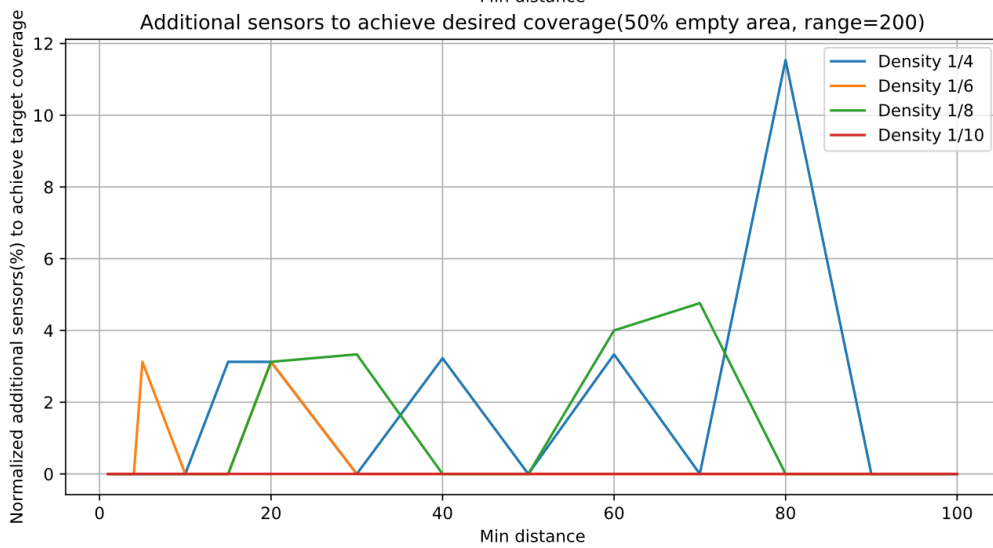
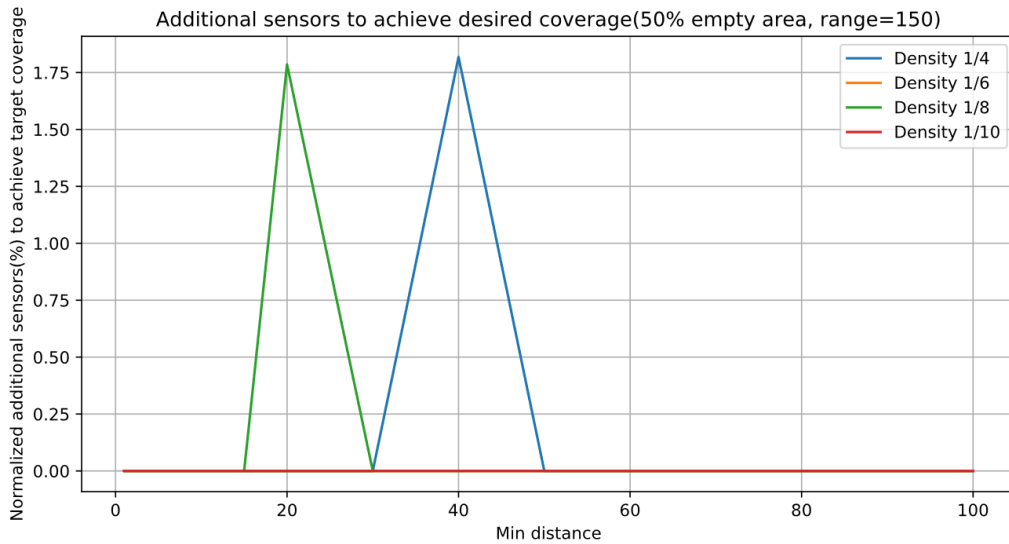




Εικόνα 115: Ποσοστό αύξησης αισθητήρων για επίτευξη ζητούμενης κάλυψης( νεκρή ζώνη 30%, Hausdorff πραγματικών)



Εικόνα 116: Ποσοστό αύξησης αισθητήρων για επίτευξη ζητούμενης κάλυψης( νεκρή ζώνη 40%, Hausdorff πραγματικών)



Εικόνα 117: Ποσοστό αύξησης αισθητήρων για επίτευξη ζητούμενης κάλυψης( νεκρή ζώνη 50%, Hausdorff πραγματικών)

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται φανερό πως όσο αυξάνεται η ακτίνα τόσο πιο λίγους αισθητήρες τοποθετεί το σύστημα και βλέπουμε πως για την ακτίνα 250 φτάνει μέχρι και 25% παραπάνω αισθητήρες για να επιτευχθεί η επιθυμητή κάλυψη. Άρα μια πρώτη παρατήρηση είναι πως η αύξηση της ακτίνας των αισθητήρων, οδηγεί στην απαίτηση παραπάνω αισθητήρων από τον ελάχιστο.

Εστιάζοντας στο πως επιδράει η αύξηση του ποσοστού των νεκρών ζωνών στο επιπλέον απαιτούμενο πλήθος αισθητήρων, παρατηρείται πως για ακτίνα 150 όσο αυξάνεται η νεκρή ζώνη τόσο πιο κοντά στο 0 τείνει και το πλήθος των παραπάνω αισθητήρων που απαιτείται για την επιθυμητή κάλυψη. Αυτό είναι απολύτως λογικό καθώς δημιουργώντας σπές δεν μειώνουμε το εμβαδόν του χώρου κάλυψης το οποίο υπολογίζεται με βάση το convex hull, κάτι που οδηγεί στο να υπάρχουν λιγότεροι χώροι με σημεία που πρέπει να καλυφθούν.

Επιπλέον, όσο αυξάνεται η ελάχιστη επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ δύο τυχαίων σημείων και συνεπώς την δημιουργία πιο αραιών σεναρίων κάλυψης, τόσο πιο μεγάλο πλήθος παραπάνω αισθητήρων χρειάζεται ο αλγόριθμος για την επιθυμητή κάλυψη. Αυτό γίνεται πιο εμφανές για ελάχιστη απόσταση τουλάχιστον 30.

Στα συγκεκριμένα διαγράμματα δεν φαίνεται να μπορεί να εξαχθεί κάποιος γενικός κανόνας σύγκρισης για της εκτελέσεις ως προς την Hausdorff.

## Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

### 5.1 Συνεισφορά και πλεονεκτήματα

Μετά την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής, ο αλγόριθμος OptEval λειτουργεί με μια πιο αυτοματοποιημένη λογική, η οποία δεν απαιτεί από τον χρήστη να εισάγει το πλήθος αισθητήρων σε κάθε εκτέλεση, αν που δεν επιτυγχάνεται το επιθυμητό ποσοστό κάλυψης. Δηλαδή, ο αλγόριθμος αποκτά εκτός από κριτήριο τερματισμού και κριτήριο σύγκλισης. Με τις επεκτάσεις που υλοποιήθηκαν μπορούμε να βλέπουμε μέσα από διαγράμματα την τοποθέτηση των αισθητήρων σε κάθε διαδοχικό βήμα, ώστε να αποκτήσουμε μια πιο καλή εσοπτεία για την λειτουργία του αλγορίθμου.

Μολονότι δεν ασχοληθήκαμε με τη θεωρητική τεκμηρίωση της καθολικά βέλτιστης κάλυψης, ο ευριστικός αλγόριθμος τροποποιήθηκε ώστε να αποθηκεύει σε κάθε βήμα εκτέλεσης την επιτεύξιμη κάλυψη. Έτσι, καταφέρνουμε να ξεφύγουμε από περιττές μελλοντικές επαναλήψεις. Αυτό, διότι, όπως παρατηρήθηκε από τη μελέτη του μεγάλου αριθμού αποτελεσμάτων εκτέλεσης, ο αλγόριθμος δεν εξασφαλίζει πως το τελευταίο βήμα της εκτέλεσης δίνει την βέλτιστη δυνατή κάλυψη, καθώς η τοποθέτηση αισθητήρων γίνεται με τέτοιο τρόπο που δεν λαμβάνει υπόψη την πυκνότητα δέντρων γύρω από τον αισθητήρα. Έτσι, μόλις η μετρική Hausdorff δείξει ότι δεν άλλαξε "πολύ" η χωροθέτηση, ή τελειώσει το όριο επαναλήψεων για δεδομένο πλήθος αισθητήρων, επιλέγουμε να επιστρέψουμε την καλύτερη κάλυψη που έχουμε αποθηκεύσει, αν το ποσοστό είναι καλύτερο από αυτό που έχουμε ορίσει σαν κριτήριο τερματισμού του αλγορίθμου.

Στο ίδιο θέμα, διαπιστώθηκε ότι η μετρική Hausdorff, η οποία είχε μελετηθεί για σενάρια εντός πολυγώνου διαστάσεων 500 x 500, δεν προσφέρει γρήγορο κριτήριο τερματισμού, καθώς μεγαλώνοντας τις διαστάσεις του πεδίου στο 2000 x 2000 η μετρική Hausdorff αργεί να συγκλίνει αισθητά.

Συνεισφορά της παρούσας εργασίας εντοπίζεται επίσης στην υλοποίηση υπηρεσίας που βοηθάει στην δημιουργία σεναρίων νεκρών ζωνών καθώς επιταχύνει αρκετά την μελέτη της συμπεριφοράς του αλγορίθμου και πλέον δεν απαιτείται χρήση λογισμικού GIS για την δημιουργία σεναρίων τυχαίων σημείων.

Τέλος, η συγγραφή του αλγορίθμου στην προγραμματιστική γλώσσα python πέρα από την ευελιξία που παρέχει, απαλλάσσει ουσιαστικά την εκτέλεση του λογισμικού από απαίτηση ειδικών αδειών, κάτι που θα βοηθήσει στην πιο γρήγορη περαιτέρω μελέτη και ανάπτυξή του.

### 5.2 Μελλοντικές Προτάσεις

Κατά την πραγμάτωση της παρούσα διπλωματικής πολλά ήταν τα ερωτήματα που δημιουργήθηκαν και που θα μπορούσαν να αποτελέσουν μελλοντικές επεκτάσεις του λογισμικού OptEval. Ιδιαίτερο θεωρητικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη σεναρίων εκτέλεσης χωροθέτησης για γεωμετρικές κάλυψης αισθητήρων διαφορετικές από την κυκλική, που υποστηρίζει στην παρούσα φάση το Λογισμικό OptEval.

Επίσης, σε ένα πραγματικό σενάριο εγκατάστασης αισθητήρων σε δάσος, ωφείλει κανείς να λάβει υπόψη του το γεγονός πως η βιομάζα γύρω από τον αισθητήρα (πλήθος δέντρων, βράχων, κτλ) επηρεάζουν την εμβέλεια του αισθητήρα, αλλάζοντας πρακτικά την γεωμετρία κάλυψης από κυκλική σε μια πιο ακανόνιστη μορφή. Αυτό σημαίνει πως μεγάλες περιοχές μπορεί να μένουν πρακτικά ακάλυπτες, οδηγώντας σε λανθασμένα σενάρια χωροθέτησης παρά το γεγονός ότι με τις προηγούμενες παραδοχές η περιοχή καλύπτεται. Σε τέτοια περίπτωση, πλέον δεν μιλάμε για θεωρητικό πρόβλημα, με πιθανότητα να μην γίνει έγκαιρά μεταφορά πληροφοριών για το φαινόμενο που παρατηρεί ο αισθητήρας, πχ για μια πυρκαγιά.

Μια τροποποίηση του αλγορίθμου που θα μπορούσε να πλησιάσει το πραγματικό σενάριο θα ήταν η αυξομείωση της ακτίνας κάλυψης του αισθητήρα με κάποιο βάρος το οποίο θα προκύπτει από το πλήθος των άλλων δέντρων που βρίσκονται μέσα στην αρχική ακτίνα κάλυψης. Με αυτό τον τρόπο θα μπορούμε να αυξομειώνουμε την ακτίνα κάλυψης του κάθε αισθητήρα λαμβάνοντας υπόψη πόσα άλλα δέντρα είναι επιτρεπτό να βρίσκονται εντός της ακτίνας κάλυψης τους για κάθε δεδομένη ακτίνα.

Ακόμη περισσότερο, αν και διαισθητικά η υπολογιστική πολυπλοκότητα του προβλήματος μεγαλώνει σημαντικά, θα ήταν δυνατό να υπολογιστούν μη-κυκλικές εμβέλειες αισθητήρων, με χρήση προσομοιωτή δικτύου.

Σημαντικό επίσης βήμα αποτελεί η δημιουργία και μελέτη ακόμα μεγαλύτερων σεναρίων τυχαίων σημείων κυρίως ως προς το μέγεθος (4000x4000, 8000x8000, κλπ) που να πλησιάζουν ακόμα περισσότερο την μελέτη στο πεδίο και δίνοντας της δυνατότητα να μελετηθεί η συμπεριφορά του αλγορίθμου για διάφορες ακτίνες εσοπτείας των αισθητήρων που να είναι πιο κοντά στις πραγματικές. Αυτό πρέπει να συνδυαστεί με την χρήση του εργαλείου δημιουργίας νεκρών ζωνών για να δημιουργηθούν σενάρια που ανταποκρίνονται πιο πολύ στην πραγματικότητα. \_

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. 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.
2. Toumpis, S., & Tassioulas, L. (2006, July 05). Optimal deployment of large wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, σσ. 2935 - 2953.
3. 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.
4. Κολεγά, Ε. (2014). "Πολυκριτηριακή αξιολόγηση δικτύων ασυρμάτων αισθητήρων, υψηλής χωρικής πυκνότητας για περιβαλλοντικές εφαρμογές" (Διδακτορική Διατριβή). Αθήνα: ΣΑΤΜ, ΕΜΠ.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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*.
10. 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.
11. 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.
12. 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.

13. Devaraj, A. (2015). Mesh Simplification in Wireless Sensor Networks Using INRCDS. 4th International Conference on Circuits, Systems, (σσ. 179-184). Kuala Lumpur: WSEAS Press.
14. 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.
15. Song, G., Zhou, Y., Ding, F., & Song, A. (2008, 8). A mobile sensor network system for monitoring of unfriendly environments. Sensors, σσ. 7259-7274.
16. 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.
17. Yick, J., Mukherjee, B., & Ghosal, D. (2008). Wireless sensor network survey. Στο Computer Networks 52 (σσ. 2292-2330).
18. Ardalan, A., & Jafari, M. (2012, 01). Multi-sensor approach to settlement analysis of earth dams. Computational geosciences, σσ. 123-138.
19. 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). Sapiro: IAG.
20. 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.
21. Σαραφιάν, Κ. (2012). Πειραματική διερεύνηση ψηφιακών κλισιομέτρων ακριβείας στη μελέτη ταλαντώσεων υψηλών κατασκευών έναντι του ανέμου (Μεταπτυχιακή εργασία). Αθήνα.
22. Di Mauro, M., & Van Cravenbroeck, J. (2012). Geodetic and Geotechnical Combined Monitoring Concept. FIG Working Week 2012. Rome.
23. Leica Geosystems. (2010). Online Help: Leica GeoMoS v5. 1. Heerbrugg: Leica Geosystems AG.
24. <http://www.leica-geosystems.com>. (2015, 8 10). Ανάκτηση από
25. [http://www.leica-geosystems.com/en/Leica-GeoMoS\\_4802.htm](http://www.leica-geosystems.com/en/Leica-GeoMoS_4802.htm).
26. 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.
27. <http://www.ysma.gr>. (2011).
28. Αστρινίδης, 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.



29. 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.
30. Mecocci, A., & Abrardo, A. (2014, 01 03). Monitoring Architectural Heritage by Wireless Sensors Networks: San Gimignano — A Case Study. *Sensors*, σσ. 770-778.
31. 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.
32. 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.
33. Kolega, E., Vescoukis, V., & Douligeris, D. (2010). Forest Fire Sensing and Decision Support using Large Scale WSNs. *International Congress on Environmental Modeling and Software (iEMSs)*. Ottawa, Ontario.
34. 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.
35. 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*.
36. 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.
37. <http://www.firesense.eu/>. (2016).
38. 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.
39. <http://www.opensense.ethz.ch/trac/>. (2016)
40. Brkovic, M., & Sretovic, V. (2012). Urban Sensing - Smart solutions for monitoring enviromental quality: Case studies from Serbia. *48th ISOCARP Congress*. Perm.
41. 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.
42. Karpis, O. (2013, 03). Wireless Sensor Networks in Intelligent Transportation Systems. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, σσ. 611-617.

43. Nellore, K., & Hancke, G. (2016, 01). A Survey on Urban Traffic Management System Using Wireless Sensor Networks. *Sensors*.
44. <https://www.topconpositioning.com>. (2016). Ανάκτηση από
45. <https://www.topconpositioning.com/enterprise-services-and-subscriptions/remote-management-tools/topcon-tierra>.
46. Djuriscic, M., Tafa, Z., Dimic, G., & Milutinovic, V. (2012). A survey of military applications of wireless sensor networks. *Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*. IEEE.
47. 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.
48. Alkhathami, M. (2015, 03). Overview of Border Control Using Wireless Sensor Network. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 6, Issue 3.
49. 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.
50. 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.
51. 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.
52. Lloyd, S. (1982, 03). Least squares quantization in PCM. *IEEE Transactions on Information Theory*, σσ. 129–137.
53. Κάβουρας, Λ. (2014). Αλγόριθμοι για τα προβλήματα k-means και k-median (Διπλωματική εργασία). Αθήνα: ΣΕΜΦΕ, ΕΜΠ.
54. Du, Q., Emelianenko, M., & Ju, L. (2006, 02 08). Convergence of the Lloyd Algorithm for Computing Centroidal Voronoi Tessellations. *SIAM (Society for Industrial and Applied Mathematics)*, σσ. 102-119.
55. Liebling, T., & Pournin, L. (2012). Voronoi Diagrams and Delaunay Triangulations: Ubiquitous Siamese twins. *Optimization Stories: Documenta Mathematica Extra Volume*, σσ. 419-431.
56. 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.
57. Κατσαβρία, Α. (2011). Γεωμετρική & Αλγοριθμική επίλυση του προβλήματος της σχεδίασης επικλινούς στέγης με δοθείσα κάλυψη. Αθήνα: ΕΜΠ.
58. 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.

59. Stillman, M., Takayama, N., & Verschelde, J. (2008). *Software for Algebraic Geometry*. New York: Springer.
60. Burns, J. (2009). Centroidal voronoi tessellations.
61. Du, Q., & Wang, D. (2005). The Optimal Centroidal Voronoi Tessellations and the Gershgorin's Conjecture in the Three-Dimensional Space. *Computers and Mathematics with Applications*.
62. Du, Q., Faber, V., & Gunzburger, M. (1999). Centroidal Voronoi Tessellations: Applications and Algorithms. *SIAM Review*, σσ. 637-676.
63. Jagla, E., & Rojo, A. (2002, 02). Sequential fragmentation: the origin of columnar quasihexagonal patterns. *Physical Review E*, vol. 65, Issue 2.
64. Dasarthy, B. (1990). *Nearest Neighbor: Pattern Classification Techniques*. IEEE Computer Society Press.
65. Knuth, D. (2016). *The Art of Computer Programming, Volume 4, Fascicle 6*. Boston: Pearson Education Inc.
66. Han, J., & Kamber, M. (2006). *Data mining: Concepts and techniques (second edition)*. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers.
67. <https://hpc.grnet.gr/supercomputer/#supercomputer>
68. <https://hpc.grnet.gr/supercomputer/#aris>
69. Δούκας, Ι. (2014). "Περί αισθητήρων, αισθητήρων και των ασυρμάτων δικτύων τους. Εφαρμογές στη γεωδαισία - γεωματική". 5ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας. Αθήνα.
70. Delaunay, Boris (1934). "Sur la sphère vide". *Bulletin de l'Académie des Sciences de l'URSS, Classe des Sciences Mathématiques et Naturelles*. 6: 793–800.
71. de Berg, M., Cheong, O., van Kreveld, M., & Overmars, M. (2008). *Computational Geometry, Algorithms and Applications*. Berlin: Springer.
72. Cormen, T., Leiserson, C., Rivest, R., & Stein, C. (2009). *Introduction to Algorithms, Third Edition*. MIT Press.
73. de Oliveira, S. (2012). A Review on Delaunay Refinement Techniques. 12th international conference on Computational Science and Its Applications (σσ. 172-187). Springer-Verlag.
74. Ηλιοδρομίτης Α. (2017). "Ανάπτυξη μεθοδολογιών χωροθετησης & αξιολόγησης ασύρματων δικτύων γεωαισθητηρων με αλγορίθμους υπολογιστικής γεωμετρίας" (Διδακτορική Διατριβή). Αθήνα: ΣΑΤΜ, ΕΜΠ.
75. Μπινη Α. (2018). "Μελέτη της συμπεριφοράς και σύγκλισης ενός αλγορίθμου υπολογιστικής γεωμετρίας για τη χωροθέτηση δικτύων ασυρμάτων αισθητήρων σε μη-ελεγχόμενα περιβάλλοντα" (Μεταπτυχιακή Διατριβή) Αθήνα: ΣΑΤΜ; ΕΜΠ.