

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών  
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ



NATIONAL TECHNICAL  
UNIVERSITY OF ATHENS  
School of Rural & Surveying Engineering  
GEOINFORMATICS  
POST-GRADUATE PROGRAMME

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ  
ΕΝΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ  
ΓΙΑ ΤΗ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ  
ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ  
ΣΕ ΜΗ-ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ**

Μεταπτυχιακή Εργασία  
**ΑΡΓΥΡΩ ΜΠΙΝΗ**  
Αγρονόμος & Τοπογράφος Μηχανικός ΕΜΠ

Επιβλέπων:  
**ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΒΕΣΚΟΥΚΗΣ**  
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ 2018





**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ  
ΕΝΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ  
ΓΙΑ ΤΗ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ  
ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ  
ΣΕ ΜΗ-ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ**

Μεταπτυχιακή Εργασία  
**ΑΡΓΥΡΩ ΜΠΙΝΗ**  
Αγρονόμος & Τοπογράφος Μηχανικός ΕΜΠ

Επιβλέπων:  
**ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΒΕΣΚΟΥΚΗΣ**  
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:  
Υπογραφή

.....  
Βασίλειος Βεσκούκης

Αν. Καθηγητής  
Ε.Μ.Π

Υπογραφή

.....  
Γεώργιος Πανταζής

Καθηγητής  
Ε.Μ.Π

Υπογραφή

.....  
Ευαγγελία Λάμπρου

Καθηγήτρια  
Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ 2018

(Υπογραφή)

.....

**ΑΡΓΥΡΩ ΜΠΙΝΗ**

**Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.**

**Copyright © Μπίνη Αργυρώ, 2018**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας μεταπτυχιακής 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 στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τη συγγραφέα.

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

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Δε θα είχε νόημα η περαιτέρω ανάγνωση του παρόντος τεύχους, εάν πρώτα δεν εξέφραζα τις θερμές ευχαριστίες μου στους ανθρώπους που συνέβαλαν, ο καθένας με τον τρόπο του, στην εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Πρώτα από όλα, επιθυμώ να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών και ταυτόχρονα επιβλέποντα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας **Βασίλειο Βεσκούκη**, κατ' αρχάς για την ανάθεση της εργασίας και την άψογη συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της. Επίσης, τον ευχαριστώ για την εκπαίδευση και την καθοδήγηση που μου πρόσφερε στο πλαίσιο αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας, αλλά και για τη κατανόηση που έδειξε ως προς τις ώρες συνάντησης που μπορούσα να παρευρεθώ στη σχολή, λόγω του εργασιακού μου ωραρίου.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών **Γεώργιο Πανταζή**, για το αμείωτο ενδιαφέρον του για την εξέλιξη και την πρόοδο μου τόσο κατά τη διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου εργασίας, όσο και όλα τα χρόνια πριν από αυτήν.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά την Καθηγήτρια της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών **Ευαγγελία Λάμπρου**, για την συμβολή της στην ακαδημαϊκή μου πορεία, καθώς και για τις γνώσεις που έχω αποκομίσει από την εκπαίδευσή της στο πλαίσιο των σπουδών μου.

Επιπλέον, ευχαριστώ πολύ τον Υποψήφιο Διδάκτορα **Αθανάσιο Ηλιοδρομίτη**, για την άμεση ανταπόκριση και την καθοδήγησή του, ώστε να κατανοήσω σε βάθος το λογισμικό που δημιούργησε στο πλαίσιο της διδακτορικής του διατριβής.

Τέλος, χρωστάω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και στους κοντινούς μου ανθρώπους για την αγάπη και τη συμπαράσταση που μου δίνουν απλόχερα όλα αυτά τα χρόνια.



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Όντας στον 21 αιώνα, η ανθρωπότητα βρίσκεται σε μια συνεχή εξέλιξη λόγω της ταχύρρυθμης ανάπτυξης της τεχνολογίας και των επιστημών. Η εξέλιξη αυτή είναι φανερή και στον τομέα του τοπογράφου μηχανικού, όπου πλέον η χρήση της πληροφορικής είναι αναπόσπαστο κομμάτι των εργασιών και των μελετών του.

Η γεωπληροφορική είναι η επιστήμη η οποία αξιοποιεί τη γεωγραφική πληροφορία και τις σύγχρονες τεχνολογίες που αναπτύσσει ο τομέας της πληροφορικής, έτσι ώστε να συγκεντρώσει, να αποθηκεύσει, να ενημερώσει, να διαχειριστεί, να επεξεργαστεί, να αναλύσει, να οπτικοποιήσει και να παρουσιάσει προτάσεις σε προβλήματα που αφορούν τις επιστήμες του χώρου. Η επιστήμη αυτή αποτελεί αντικείμενο του τοπογράφου μηχανικού.

Αξιοποιώντας τα εργαλεία που παρέχει η γεωπληροφορική και ο προγραμματισμός, είναι εφικτή η μελέτη αλγορίθμων που σχετίζονται με την χωροθέτηση ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Επιπλέον, η υλοποίηση προσομοιώσεων πραγματικών καταστάσεων μέσω της πληροφορικής έχει εξελιχθεί σε μεγάλο βαθμό, με αποτέλεσμα να παράγονται «πραγματικά» δεδομένα, μέσω του υπολογιστή.

Τα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων αποτελούνται από διασκορπισμένους αυτόνομους αισθητήρες για την παρακολούθηση φυσικών ή περιβαλλοντολογικών συνθηκών, όπως η θερμοκρασία, ο ήχος, η ατμοσφαιρική πίεση κτλ. και μέσω συνεργασίας μεταφέρουν τα δεδομένα μέσω του δικτύου σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Τα πιο μοντέρνα δίκτυα είναι ικανά και να δίνουν αλλά και να δέχονται πληροφορίες πράγμα που τους επιτρέπει να ελέγχουν την δραστηριότητα των αισθητήρων. Το κίνητρο για την ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων με αισθητήρες ήταν οι στρατιωτικές εφαρμογές όπως η παρακολούθηση των πεδίων μάχης. Σήμερα τέτοια δίκτυα χρησιμοποιούνται σε πολλές καταναλωτικές και βιομηχανικές εφαρμογές, την παρακολούθηση και τον έλεγχο της βιομηχανικής παραγωγής, την παρακολούθηση των μηχανημάτων υγείας και πολλά άλλα.

Συνεπώς, η ορθή χωροθέτηση τέτοιων δικτύων αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα για τον καθορισμό του κόστους αλλά και της λειτουργικότητας ενός δικτύου ασύρματων αισθητήρων.





## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....</b>	<b>I</b>
<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....</b>	<b>III</b>
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....</b>	<b>V</b>
<b>ΠΙΝΑΚΕΣ.....</b>	<b>VII</b>
<b>ΕΙΚΟΝΕΣ.....</b>	<b>IX</b>
<b>ΣΧΗΜΑΤΑ.....</b>	<b>XI</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>	<b>XIII</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XV</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

#### **ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΓΑΙΩΔΙΣΘΗΤΗΡΩΝ**

1.1 Ορισμός του προβλήματος.....	3
1.2 Μελέτη μέχρι σήμερα – Υφιστάμενες λύσεις: Κατανομές σημείων στο χώρο.....	3
1.3 Η προσέγγιση του Ηλιοδρομίτη Α.....	7
1.4 Ανοικτά ζητήματα: Σύγκλιση λύσης, μετρικές, μελέτη οριακής συμπεριφοράς...	7
1.5 Στρατηγική αντιμετώπισης του προβλήματος.....	8

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

#### **ΣΕΝΑΡΙΑ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ**

2.1 Κατανομές σημείων που αντιστοιχούν σε πραγματικές περιπτώσεις.....	11
2.1.1 Πυκνότητα κατανομής σημείων (DIV).....	12
2.1.2 Διασπορά κατανομής σημείων (M).....	12
2.2 Θεωρητικό υπόβαθρο υλοποίησης των κατανομών τυχαίων σημείων.....	13

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

#### **ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ OptEval**

3.1 Αξιολόγηση κριτηρίου σύγκλισης (θεωρητικές θέσεις αισθητήρων).....	19
3.2 Προτεινόμενο κριτήριο σύγκλισης (πραγματικές θέσεις αισθητήρων).....	22
3.3 Μετρική - Hausdorff distance.....	22

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ**

4.1	Το πρόβλημα εύρεσης τυχαίων σημείων.....	27
4.2	Χρήση περιβάλλοντος gis για τη δημιουργία νεκρών ζωνών.....	27
4.3	Λογισμικό παραγωγής τυχαίων σημείων.....	29
4.4	Κρισιμότητα της my_inpolygon συνάρτησης.....	35
4.5	Διάγραμμα ροής του λογισμικού παραγωγής τυχαίων σημείων.....	37
4.5.1	Λογισμικό δημιουργίας βοηθητικού πίνακα AREA.....	37
4.5.2	Λογισμικό παραγωγής τυχαίων σημείων.....	38
4.6	Εφαρμογή της Hausdorff distance στον αλγόριθμο του OptEval.....	39
4.6.1	Διάγραμμα ροής τροποποίησης OptEval για την παρακολούθηση των Αποτελεσμάτων.....	40
4.6.2	Διάγραμμα ροής τροποποίησης OptEval για την χωροθέτηση βάσει των πραγματικών θέσεων.....	41
4.6.3	Επιπρόσθετα αρχεία εξόδου του OptEval.....	42
4.7	Αποτελέσματα εφαρμογής σεναρίων στο λογισμικού OptEval.....	42

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ**

5.1	Συμπεράσματα.....	87
5.2	Προτάσεις – επόμενα βήματα.....	89

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>91</b>
--------------------------	-----------

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....</b>	<b>93</b>
-----------------------	-----------

## ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 2.1:	Σενάρια που προσομοιάζουν <b>δάσος</b> και η δημιουργία τους γίνεται με την διαδικασία <b>A</b> .....	15
Πίνακας 2.2:	Σενάρια που προσομοιάζουν <b>δάσος</b> και η δημιουργία τους γίνεται με την διαδικασία <b>B</b> .....	16
Πίνακας 2.3:	Σενάρια που προσομοιάζουν <b>πόλη</b> , δημιουργημένα με την διαδικασία <b>A</b> .....	17
Πίνακας 2.4:	Σενάρια που προσομοιάζουν <b>πόλη</b> , δημιουργημένα με την διαδικασία <b>B</b> .....	18
Πίνακας 2.5:	Σενάρια που αποτελούνται από δοσμένα σύνολα σημείων.....	18
Πίνακας 4.1:	Αποτελέσματα του λογισμικού <b>OptEval</b> .....	43
Πίνακας 4.2:	Αποτελέσματα του τροποποιημένου λογισμικού <b>OptEval</b> .....	85



## ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 2.1: κανονικοποιημένη κατανομή σημείων.....	11
Εικόνα 2.2: τυχαία κατανομή σημείων.....	11
Εικόνα 2.3: Δάσος με λίμνη.....	12
Εικόνα 2.4: Δάσος με ξέφωτο.....	12
Εικόνα 2.5: Σκαρίφημα απεικόνισης περίπτωσης τύπου FOREST A.....	13
Εικόνα 2.6: Σκαριφήματα απεικόνισης περίπτωσης τύπου FOREST B Αρχικά σημεία – σημεία μετά την αφαίρεση.....	14
Εικόνα 2.7: Σκαρίφημα απεικόνισης περίπτωσης τύπου CITY A.....	14
Εικόνα 2.8: Σκαρίφημα απεικόνισης περίπτωσης τύπου CITY B.....	14
Εικόνα 4.1: Πολύγωνα FOREST A1 & B1.....	27
Εικόνα 4.2: Πολύγωνα FOREST A2 & B2.....	27
Εικόνα 4.3: Πολύγωνα FOREST A3 & B3.....	28
Εικόνα 4.4: Πολύγωνα FOREST A4 & B4.....	28
Εικόνα 4.5: Πολύγωνα CITY A1 & B1.....	28
Εικόνα 4.6: Πολύγωνα CITY A2 & B2.....	28
Εικόνα 4.7: Πολύγωνο λογισμικού με νεκρές ζώνες.....	29
Εικόνα 4.8: Δεδομένα εισόδου του λογισμικού παραγωγής τυχαίων σημείων.....	30
Εικόνα 4.9: Οπτικοποίηση αποτελέσματος σεναρίου FOREST A33.....	31
Εικόνα 4.10: Οπτικοποίηση αποτελέσματος σεναρίου FOREST A02.....	32
Εικόνα 4.11: Οπτικοποίηση αποτελέσματος σεναρίου FOREST B03.....	32
Εικόνα 4.12: Οπτικοποίηση αποτελέσματος σεναρίου FOREST B14.....	33
Εικόνα 4.13: Οπτικοποίηση αποτελέσματος σεναρίου FOREST B23.....	33
Εικόνα 4.14: Οπτικοποίηση αποτελέσματος σεναρίου FOREST B31.....	34
Εικόνα 4.15: Οπτικοποίηση αποτελέσματος σεναρίου FOREST B44.....	34
Εικόνα 4.16: Οπτικοποίηση αποτελέσματος σεναρίου CITY B22.....	34
Εικόνα 4.17: Αρχείο καταγραφής παραμέτρων ελέγχου του λογισμικού <b>OptEval</b> ....	42
Εικόνα 4.18: Αποτελέσματα OptEval του Δήμου Τρίπολης για 1850 αισθητήρες εμβέλειας 100m.....	83
Εικόνα 4.19: Αποτελέσματα OptEval του Δήμου Τρίπολης για 17 αισθητήρες εμβέλειας 1000m.....	83
Εικόνα 4.20: Αποτελέσματα OptEval του συνόλου Καλλικρατικού Δήμου Τρίπολης για 1200 αισθητήρες εμβέλειας 500m.....	84

Εικόνα 4.21: Αποτελέσματα OptEval του συνόλου Καλλικρατικού Δήμου Τρίπολης για 300 αισθητήρες εμβέλειας 1000m.....	84
---	----

## ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής αλγόριθμου Lloyd για κατασκευή CVT.....	19
Σχήμα 3.2: Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας χωροθέτησης.....	21
Σχήμα 3.3: Επεξήγηση της <b>Hausdorff distance</b> .....	23
Σχήμα 3.4: Υπολογισμός <b>Hausdorff distance</b> για σετ σημείων που ανήκουν σε ευθείες.....	24
Σχήμα 3.5: Υπολογισμός <b>Hausdorff distance</b> για σετ σημείων που ανήκουν σε κύκλους.....	25





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έχει ως αντικείμενο την μελέτη της συμπεριφοράς και σύγκλισης αλγορίθμου υπολογιστικής γεωμετρίας για τη χωροθέτηση δικτύων ασύρματων αισθητήρων.

Στο **πρώτο κεφάλαιο**, παρουσιάζεται το πρόβλημα που θα μελετηθεί. Παρατίθενται η μελέτη που έχει γίνει μέχρι σήμερα, μέσω των υφιστάμενων λύσεων. Στη συνέχεια, περιγράφεται η προσέγγιση του Ηλιοδρομίτη Α. μέσω της διδακτορικής του διατριβής και την υλοποίηση του λογισμικού OptEval. Αναφέρονται επίσης, τα ανοικτά ζητήματα, τα οποία είναι η αναζήτηση κριτηρίου σύγκλισης, και η μελέτη οριακής συμπεριφοράς. Τέλος, παρουσιάζεται περιληπτικά η στρατηγική αντιμετώπισης του προβλήματος.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο**, αναφέρεται η ανάγκη ύπαρξης κατανομών σημείων που αντιστοιχούν σε πραγματικές περιπτώσεις, τις οποίες καλείται να εκτελέσει το λογισμικό OptEval. Επιπλέον, ορίζονται οι δύο βασικοί παράμετροι που θα καθορίσουν τις κατανομές σημείων στο πλαίσιο αυτής της μελέτης. Πρόκειται για την πυκνότητα κατανομής σημείων (DIV) και τη διασπορά κατανομής σημείων (M). Έπειτα, παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο υλοποίησης των κατανομών τυχαίων σημείων. Συγκεκριμένα, υλοποιούνται σενάρια κατανομών τυχαίων σημείων τα οποία περιγράφουν πραγματικές περιπτώσεις.

Στο **τρίτο κεφάλαιο**, γίνεται μια ανασκόπηση σχετικά με την διαδικασία τερματισμού του λογισμικού OptEval καθώς και για την εκτέλεσή του βασιζόμενο στις θεωρητικές θέσεις αισθητήρων. Έπειτα, περιγράφεται το προτεινόμενο κριτήριο σύγκλισης καθώς και η επιδίωξη της αξιοποίησης των πραγματικών θέσεων αισθητήρων. Τέλος, περιγράφεται αναλυτικά η Μετρική - Hausdorff distance, της οποίας η ενσωμάτωση στο λογισμικό OptEval, αποτελεί το ερευνητικό κομμάτι της παρούσας εργασίας.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο**, αναφέρεται το πρόβλημα εύρεσης τυχαίων σημείων, τα οποία απεικονίζουν πραγματικές καταστάσεις. Στη συνέχεια, περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος δημιουργίας των τυχαίων σημείων για το κάθε σενάριο, καθώς και η κατασκευή του λογισμικού παραγωγής τυχαίων σημείων, το οποίο υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Δίνονται αναλυτικά τα διαγράμματα ροής που το περιγράφουν καθώς και η ανάλυση της όλης διαδικασίας που ακολουθεί το λογισμικό αυτό. Επίσης, πραγματοποιείται η εφαρμογή της Hausdorff distance στον αλγόριθμο του OptEval και παρατίθενται και εδώ το διάγραμμα ροής τροποποίησης OptEval για την παρακολούθηση των αποτελεσμάτων του, καθώς και το διάγραμμα ροής τροποποίησης OptEval για την χωροθέτηση αισθητήρων βάσει των πραγματικών θέσεων. Τέλος, δίνονται σε πίνακες αναλυτικά τα αποτελέσματα εφαρμογής των σεναρίων στο λογισμικό OptEval, συνοδευόμενα από τα διαγράμματα της Hausdorff distance για κάθε σενάριο.

Το **πέμπτο κεφάλαιο**, περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, καθώς και τις προτάσεις που γίνονται, ώστε να βελτιστοποιηθεί η χωροθέτηση δικτύων ασύρματων αισθητήρων και να προταθούν τα επόμενα βήματα με σκοπό την συνέχιση της ερευνητικής εργασίας.

# STUDY OF THE BEHAVIOUR AND CONVERGENCE OF A COMPUTATIONAL GEOMETRY ALGORITHM FOR WSN DEPLOYMENT IN NON-CONTROLLED ENVIRONMENTS

## Abstract

This post-graduate thesis aims to study the behavior and convergence of a computational geometry algorithm for wireless sensor networks deployment.

In the **first chapter** the problem to be studied is described. All the completed research until today is presented, through the existing solutions. Subsequently, the approach of Iliodromitis A. through his doctoral thesis and the implementation of OptEval software is described. Unsolved issues are also mentioned, including the search for convergence criteria, and the study of marginal behavior. Finally, the strategy of dealing with the problem is summarized.

In the **second chapter**, the need for the distribution of points corresponding to real cases is highlighted, which happens through the use of the software called OptEval. In addition, the two key parameters defining point distributions in this study are mentioned. These parameters are point distribution density (DIV) and point distribution dispersion (M). Furthermore, the theoretical background for the implementation of random point distributions is presented. In particular, scenarios of random point distributions are created which describe actual cases.

In the **third chapter**, a review of the OptEval software shutdown process and its execution is presented, based on theoretical sensor positions. Moreover, the proposed convergence criterion as well as the pursuit of the use of actual sensor positions are described. Finally, the metric - Hausdorff distance is described in detail, the integration of which in the OptEval software is the research part of this paper.

In the **fourth chapter**, the problem of finding random points, which depict real situations is described. Then, the way to create random points for each scenario, as well as the construction of the random point production software, is described in detail, which was implemented in the context of this paper. The flow charts that describe it as well as the analysis of the whole process this software is using, are discussed. Hausdorff distance is also applied to the OptEval algorithm and the OptEval flow diagram for monitoring its results is also shown, as well as the OptEval modulation flow diagram for the location of sensors based on actual positions. Finally, the results of the applied scenarios in OptEval software, accompanied by the Hausdorff distance diagrams for each scenario, are given in tables.

The **fifth chapter** includes the conclusions from this postgraduate thesis and the suggestions made to optimize the location of wireless sensor networks and to propose the next steps for the continuation of the research.



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια η επιστήμη της πληροφορικής έχει αναπτυχθεί ραγδαία. Η πρόσβαση σε δεδομένα κάθε είδους είναι πλέον υπόθεση ρουτίνας με αποτέλεσμα να ο άνθρωπος να είναι πλέον πομπός και δέκτης δεδομένων στην καθημερινότητά του κυρίως μέσω του διαδικτύου.

Συγκεκριμένα, ο σημαντικότερος παράγοντας εξάπλωσης αυτού του φαινομένου είναι το διαδίκτυο, η ευκολία πρόσβασης σε αυτό και κυρίως η ύπαρξη ψηφιακών χαρτογραφικών υποβάθρων για κάθε σημείο της γης. Έτσι, είναι εφικτή η αναπαράσταση των μετρούμενων μεγεθών, σε χάρτες και διαγράμματα ακόμη και σε πραγματικό χρόνο. Η πληροφορία σχετικά με την τιμή ενός παρατηρούμενου μεγέθους αποκτά μεγαλύτερη σημασία αν παρέχεται την ίδια στιγμή και η αντίστοιχη πληροφορία σχετικά με τη θέση της μέτρησης. Η πληροφορία της θέσης εξέλιξε τους αισθητήρες σε γεωαισθητήρες. Συσκευές, δηλαδή, που η πληροφορία που παρέχουν είναι γεωαναφεραμένη σε δύο ή σε τρεις διαστάσεις. Δεδομένου ότι η ακτίνα μέσα στην οποία ένας γεωαισθητήρας μπορεί να ανιχνεύει ή να μετρά το επιθυμητό μέγεθος είναι σχετικά περιορισμένη, η επόμενη μεγάλη πρόκληση ήταν η οργάνωση των γεωαισθητήρων σε δίκτυα, κατάλληλα κατανομημένα στο χώρο ώστε να παρέχουν πλήρη κάλυψη της περιοχής μελέτης, χρησιμοποιώντας τον ελάχιστο δυνατό αριθμό δεκτών. Η οργάνωση αυτή καλείται χωροθέτηση του δικτύου.

Η χωροθέτηση δικτύων ασύρματων αισθητήρων μπορεί να πραγματοποιηθεί από πλήθος λογισμικών, τα οποία έχουν υλοποιηθεί μέχρι σήμερα. Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη του λογισμικού OptEval, το οποίο δημιουργήθηκε από τον υποψήφιο διδάκτορα του ΕΜΠ, Ηλιοδρομίτη Α. στο πλαίσιο της διδακτορικής του διατριβής. Το λογισμικό αυτό πραγματοποιεί την χωροθέτηση δικτύων γεωαισθητήρων.

Επιπλέον, μέσω αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας αναζητείται κριτήριο σύγκλισης του λογισμικού OptEval, με τη βοήθεια της μετρικής Hausdorff distance. Τέλος, δημιουργείται ένα λογισμικό παραγωγής σεναρίων μελέτης, τα παράγωγα του οποίου αξιοποιούνται για την διεξαγωγή της μελέτης αυτής.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΓΑΙΩΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

### 1.1 Ορισμός του προβλήματος

Η βέλτιστη εγκατάσταση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων ή γεωαισθητήρων (WSN ή GSN), είναι πολυδιάστατο πρόβλημα με δύο κύριες συνιστώσες: τη βέλτιστη δικτυακή κάλυψη και τη βέλτιστη χωρική κάλυψη με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του κόστους (πλήθος αισθητήρων κ.ά. παράμετροι). Η βέλτιστη τοπολογία για τη δικτυακή κάλυψη του δικτύου είναι η τοπολογία κυψέλης, με τους αισθητήρες να είναι ιδανικά διατεταγμένοι στο κέντρο κανονικών εξαγώνων. Αντίστοιχα, η διάταξη κόμβων διατεταγμένων σε κάναβο 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, όπου ο αριθμός των αισθητήρων είναι επίσης μικρός και οι θέσεις τοποθέτησης ελεγχόμενες και συγκεκριμένες, είναι εφικτή και η τοποθέτησή τους σε διάταξη ιδανικής γεωμετρίας.

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

Το πρόβλημα γίνεται πιο ενδιαφέρον όταν οι θέσεις εγκατάστασης δεν είναι συγκεκριμένες και ελεγχόμενες, όπως συνήθως ισχύει στο πεδίο. Η τοποθέτησή τους υπό διάταξη ιδανικής γεωμετρίας (ισόπλευρα τρίγωνα), είναι πρακτικά αδύνατη. Χαρακτηριστικό 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 απαραίτητα σε διάταξη κανονικού τριγωνικού κανάβου.

Έτσι λοιπόν, αναζητούνται οι καλύτερες δυνατές θέσεις εγκατάστασης, από ένα πλήθος υποψηφίων θέσεων. [Πιiodromitis, Pantazis, & Vescoukis, 2017]

### 1.2 Μελέτη μέχρι σήμερα – Υφιστάμενες λύσεις: Κατανομές σημείων στο χώρο

Η χωροθέτηση ασύρματων δικτύων αισθητήρων και γεωαισθητήρων καθώς και η βελτιστοποίηση των δικτύων, έχουν απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα. Η χωροθέτηση και η βελτιστοποίηση αυτής, αφορούν τόσο στην γεωγραφική κάλυψη, όσο και στη δικτυακή κάλυψη της περιοχής μελέτης. Αμφότερα είναι εξίσου σημαντικά

καθώς ελάχιστο νόημα έχει η πλήρης γεωγραφική κάλυψη μιας περιοχής, αν είναι αδύνατη η επίτευξη επικοινωνίας μεταξύ των αισθητήρων. Αντίστροφα, ακόμα και αν λυθούν τα προβλήματα επικοινωνίας και σύνδεσης του δικτύου, αν δεν πληρείται η γεωγραφική κάλυψη της περιοχής, το δίκτυο δεν επιτυγχάνει το σκοπό του.

Αρχικά, αξίζει να σημειωθεί ότι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης δικτυακής επικοινωνίας υποδεικνύονται 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) προτείνεται ως μέθοδος βελτιστοποίησης της δικτυακής επικοινωνίας από τους [Zhou, Jin, & Wu, 2013]. Συγκεκριμένα, στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής «*Ανάπτυξη μεθοδολογιών χωροθέτησης & αξιολόγησης ασυρμάτων δικτύων γεωαισθητήρων με αλγορίθμους υπολογιστικής γεωμετρίας*» [ΗΛΙΟΔΡΟΜΙΤΗΣ,Α, 2017] θεωρείται ότι τα σημεία εγκατάστασης βρίσκονται τοποθετημένα σε θέσεις που επιτυγχάνουν ιδανική γεωμετρία και όχι σε τυχαίες θέσεις. Η κεντροειδής διαμέριση Voronoi χρησιμοποιείται ως η κεντρική μεθοδολογία επίλυσης του προβλήματος της χωροθέτησης σε αυτή τη διδακτορική διατριβή.

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). Δηλαδή, δίνουν μια λύση από ένα σύνολο πιθανών λύσεων, σε μικρό χρονικό διάστημα, αλλά δεν αποδεικνύεται ότι αυτή είναι η καλύτερη δυνατή. Παραμένει λοιπόν το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης. Επιπλέον, στις περισσότερες μελέτες, δεν υπάρχει η απαίτηση για δεσμευμένες θέσεις εγκατάστασης των αισθητήρων, αλλά η τοποθέτηση γίνεται σε τυχαίες θέσεις, πράγμα θεωρητικά «βολικό», στην πράξη, όμως, δεν είναι πάντα εφαρμόσιμο.

Στην ελληνική βιβλιογραφία, έχει προταθεί ευρετικός αλγόριθμος σχεδιασμού και υλοποίησης ενός δικτύου αισθητήρων ευρείας κλίμακας και υψηλής χωρικής πυκνότητας, σε σχέση με το απόλυτο θεωρητικό σενάριο, το ιδανικό πλέγμα αισθητήρων. [Κολεγά, 2014], [Kolega & Vescoukis, 2013] Στην περίπτωση αυτή, υπάρχει η απαίτηση οι θέσεις εγκατάστασης των αισθητήρων να είναι σε συγκεκριμένα – δεσμευμένα σημεία. Δίνονται οι πιθανές θέσεις τοποθέτησης, που είναι οι συντεταγμένες των δέντρων, στην περίπτωση ενός δικτύου ανίχνευσης πυρκαγιάς. 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. Προφανώς, όσο αυξάνεται το  $E_0$ , τόσο περισσότερα σημεία δεσμεύονται, αλλά τόσο χειροτερεύει η ιδανική γεωμετρία. Η μετατόπιση του ιδανικού πλέγματος τριγώνων, γίνεται εισάγοντας κάθε φορά τις τιμές μετατόπισης σε σχέση με την αρχική λύση. Έτσι μετά από δοκιμές προκύπτει η λύση με τα περισσότερα δεσμευμένα σημεία, χωρίς να



εξασφαλίζεται, 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 επικοινωνίας για μεγάλες περιοχές προτείνεται από τους [Wang, Hu, & Tseng, 2005]. Στη μεθοδολογία αυτή, συγκρίνεται η ακτίνα ανίχνευσης (sensing range)  $r_s$  και η ακτίνα επικοινωνίας (connectivity range)  $r_c$  του αισθητήρα και διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

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

Για λόγους απλότητας, που δεν ισχύουν πάντα, θεωρείται ότι τόσο η επικοινωνιακή, όσο και η ανιχνευτική εμβέλεια των αισθητήρων είναι κύκλος, πράγμα που δεν ισχύει στις πιο ενδιαφέρουσες περιπτώσεις. Και στις δύο περιπτώσεις η τοποθέτηση βασίζεται στην επίτευξη ιδανικής γεωμετρίας, αλλά δε λαμβάνονται καθόλου υπόψη οι ιδιαιτερότητες της περιοχής μελέτης. Όπως έχει αναφερθεί η ιδανική γεωμετρία επιτυγχάνεται με τη πλήρη κάλυψη, αλλά αυξάνει σημαντικά το κόστος, ενώ 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. Στην περίπτωση αυτή, λαμβάνονται ως δεδομένα η περιοχή μελέτης και οι υποψήφιες θέσεις τοποθέτησης. Αρχικά, θεωρείται ότι τοποθετούνται αισθητήρες σε όλα τα σημεία και κατασκευάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα Voronoi. Στη συνέχεια το σημείο με το μικρότερο πολύγωνο αφαιρείται, καθώς η περιοχή του μπορεί να επιβλέπεται από τους όμορους αισθητήρες. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται από την αρχή μέχρι όλα τα πολύγωνα Voronoi να είναι μεγαλύτερα από κάποιο δοσμένο κατώφλι (όριο). Για μεγάλο αριθμό αισθητήρων ο αλγόριθμός γίνεται εξαιρετικά αργός. [Vieira, Vieira, & et al., 2003]

Επιπρόσθετα, ο τριγωνισμός Delaunay χρησιμοποιείται και αυτός ως βάση σε αλγορίθμους χωροθέτησης δικτύων αισθητήρων. Οι ιδιότητες του τριγωνισμού Delaunay είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στις περιπτώσεις κάλυψης ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Τα πλεονεκτήματα του σε σχέση με τον τετραγωνικό κανάβο 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 επιτυγχάνουν την ελαχιστοποίηση στην κατανάλωση ενέργειας κατά την επικοινωνία των αισθητήρων και πλήρη κάλυψη της περιοχής. Και σε αυτή την περίπτωση όμως λαμβάνεται ιδανική γεωμετρία χωροθέτησης.

Ύστερα, 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, το οποίο είναι ένα άλλο ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα.

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

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

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

### 1.3 Η προσέγγιση του Ηλιοδρομίτη Α.

Στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής «*Ανάπτυξη μεθοδολογιών χωροθέτησης & αξιολόγησης ασυρμάτων δικτύων γεωαισθητήρων με αλγορίθμους υπολογιστικής γεωμετρίας*» αναπτύχθηκε και υλοποιήθηκε μια νέα μεθοδολογία καθώς και το αντίστοιχο λογισμικό χωροθέτησης και αξιολόγησης της χωροθέτησης ασύρματων δικτύων γεωαισθητήρων, με βασικό κριτήριο την επίτευξη ιδανικής γεωμετρίας.

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

- Βασίζεται σε εργαλεία και μεθόδους της υπολογιστικής γεωμετρίας. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιείται η κεντροειδής διαμέριση Voronoi (centroidal Voronoi tessellation) και ο προσδιορισμός του εγγύτερου γείτονα (nearest neighbor search).
- 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), 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.

Η διαδικασία αυτή, εκτελείται 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.

### 1.4 Ανοικτά ζητήματα: Σύγκλιση λύσης, μετρικές, μελέτη οριακής συμπεριφοράς

Ο σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η εκτεταμένη μελέτη της συμπεριφοράς του αλγορίθμου και του λογισμικού **OptEval**, που υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής του Α. Ηλιοδρομίτη, με σκοπό την ανάδειξη της συμπεριφοράς του και ενδεχομένως τη βελτίωσή του με την εύρεση κριτηρίου σύγκλισης.

Για την αποφυγή εκτέλεσης μεγάλου αριθμού επαναλήψεων (iterations) χωρίς να βελτιώνεται η λύση, θα πρέπει να διερευνηθεί η ύπαρξη κάποιου κριτηρίου σύγκλισης

του αλγορίθμου, ώστε να παρέχεται η βέλτιστη χωροθέτηση των γεωαισθητήρων του ασύρματου δικτύου με όσο το δυνατό λιγότερες επαναλήψεις. Μέχρι στιγμής, το λογισμικό τερματίζεται αφού πραγματοποιηθεί ο δοσμένος αριθμός επαναλήψεων, και κάθε φορά προσδιορίζονται οι ιδανικές θεωρητικές θέσεις εγκατάστασης. Ο αριθμός των επαναλήψεων είναι προσεγγιστικός με αποτέλεσμα να μην υπάρχει αξιολόγηση του αποτελέσματος κάθε βήματος χωροθέτησης, σε σχέση με το προηγούμενο και ως προς την ύπαρξη καλύτερων τελικών θέσεων. Στην παρούσα εργασία διερευνάται με ποιο τρόπο ο αλγόριθμος συγκλίνει και αναζητείται κριτήριο τερματισμού του αλγορίθμου.

Για την μελέτη της σύγκλισης του αλγορίθμου, αναζητείται μια μετρική η οποία ελέγχει τα αποτελέσματα μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων. Επειδή ο αλγόριθμος παράγει ως αποτέλεσμα ένα νέφος σημείων στο επίπεδο, ένας τέτοιος έλεγχος αποτελεί πρόκληση. Θα διερευνηθεί στο πλαίσιο αυτό μια γεωμετρική μετρική η οποία υπολογίζει μια απόσταση δύο νεφών σημείων, η οποία και θα αποτελέσει το κλειδί στην αξιολόγηση της διαδικασίας σύγκλισης.

Επιπρόσθετα, επειδή ο συγκεκριμένος αλγόριθμος αποσκοπεί στη χωροθέτηση γεωαισθητήρων πραγματικών περιπτώσεων, όπως για παράδειγμα η υλοποίηση ασύρματου δικτύου ανίχνευσης πυρκαγιάς σε ένα δάσος, πρέπει να εξετασθούν οριακές περιπτώσεις ώστε να διαπιστωθεί η ορθότητα της χωροθέτησης που προκύπτει μέσα από αυτόν.

## **1.5 Στρατηγική αντιμετώπισης του προβλήματος**

Για την αντιμετώπιση των ανωτέρω ακολουθείται μια σειρά διαδικασιών, μέσα από τις οποίες θα μελετηθεί η συμπεριφορά του αλγορίθμου και του λογισμικού και θα δοθούν προτάσεις τροποποίησής του.

Αρχικά, δημιουργήθηκαν σενάρια τα οποία περιέχουν σημεία στο επίπεδο με σκοπό να εξετασθούν τα αποτελέσματα της χωροθέτησης του λογισμικού, τόσο ως προς την ικανότητα εκτέλεσης για μεγάλο όγκο δεδομένων όσο και σε διαφορετικές πυκνότητες και κατανομές σημείων που προσομοιάζουν πραγματικές (και δύσκολες) καταστάσεις κάλυψης του χώρου.

Επόμενο βήμα, αποτελεί η έρευνα κριτηρίων σύγκλισης του αλγορίθμου, ώστε να μην ορίζεται πλέον στο λογισμικό αριθμός επαναλήψεων των διαδικασιών προσδιορισμού των καλύτερων θεωρητικών θέσεων τοποθέτησης αισθητήρων. Μάλιστα, επιχειρείται να διερευνηθεί αν είναι προτιμότερο να 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 θεωρητικών θέσεων.

Η εργασία ολοκληρώνεται με τροποποίηση του υφιστάμενου λογισμικού **OptEval** ώστε να ενσωματώνει τα νέα στοιχεία που προσδιορίστηκαν σε αυτήν την μεταπτυχιακή εργασία.

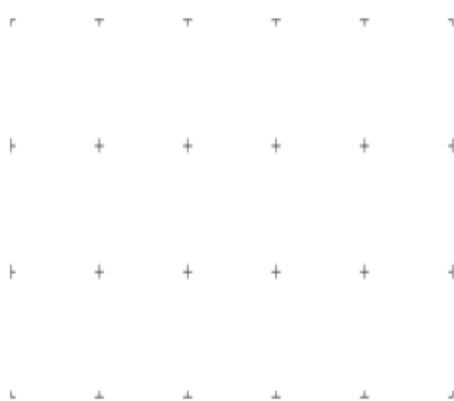


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΣΕΝΑΡΙΑ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ

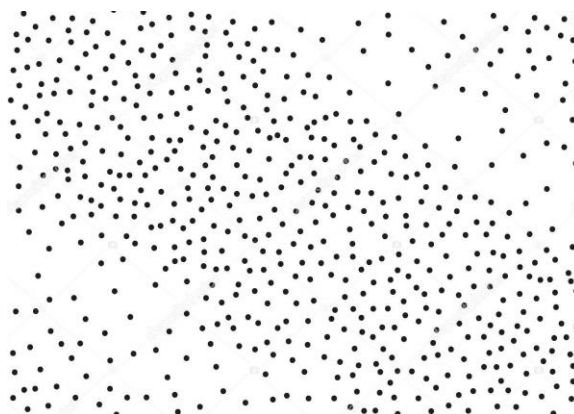
### 2.1 Κατανομές σημείων που αντιστοιχούν σε πραγματικές περιπτώσεις

Η αναζήτηση της βέλτιστης διαδικασίας αξιολόγησης των αποτελεσμάτων του λογισμικού **OptEval**, δημιούργησε την ανάγκη ύπαρξης κατανομών σημείων που να προσομοιάζουν πραγματικές καταστάσεις. Συγκεκριμένα, το ενδεχόμενο χωροθέτησης ασυρμάτου δικτύου γεωαισθητήρων ανίχνευσης πυρκαγιάς σε ένα δάσος, όπου οι πιθανές θέσεις τοποθέτησής των γεωαισθητήρων είναι τα δέντρα, είναι ένα παράδειγμα, το οποίο θα μπορούσε να κληθεί το λογισμικό **OptEval** να επιλύσει.

Οι μέχρι τώρα εφαρμογές που έχουν εκτελεστεί από το λογισμικό αυτό, απαρτίζονται τόσο από κανονικοποιημένες κατανομές σημείων (κάναβος), όσο και από τυχαίες οι οποίες όμως έχουν μια ομοιόμορφη πυκνότητα. Από τις εφαρμογές αυτές προέκυψε ότι ο αλγόριθμός ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στις συγκεκριμένες περιπτώσεις κατανομών σημείων, παρέχοντας ικανοποιητικό ποσοστό κάλυψης της εκάστοτε περιοχής μελέτης.



Εικόνα 2.1: κανονικοποιημένη κατανομή σημείων



Εικόνα 2.2: τυχαία κατανομή σημείων

Το ερώτημα που δημιουργείται είναι εάν το λογισμικό μπορεί να ανταποκριθεί εξίσου καλά στη χωροθέτηση αισθητήρων σε κατανομές σημείων με ιδιαιτερότητες και εάν η χωροθέτηση αυτή είναι η βέλτιστη. Ένα παράδειγμα τέτοιας κατανομής θα μπορούσε να είναι ένα δάσος που περιβάλλει μια λίμνη ή ένα δάσος με ξέφωτα, όπως φαίνεται στις εικόνες 2.3 και 2.4.

Συνεπώς, για να απαντηθεί το παραπάνω ερώτημα απαιτείται η τεχνητή δημιουργία κατανομών σημείων που να προσομοιάζουν περιοχές με ιδιαιτερότητες. Για το λόγο αυτό επιλέγεται να προκύπτουν τα σημεία με τυχαίο μεν τρόπο, όμως βάσει συγκεκριμένων περιορισμών. Οι παράμετροι που καθορίζουν τις κατανομές αυτές είναι η πυκνότητα των σημείων και η διασπορά τους.



Εικόνα 2.3: Δάσος με λίμνη



Εικόνα 2.4: Δάσος με ξέφωτο

### 2.1.1 Πυκνότητα κατανομής σημείων (DIV)

Αρχικά, με τον όρο πυκνότητα αναφέρεται ο αριθμός των σημείων της εκάστοτε κατανομής σε προκαθορισμένων και σταθερών διαστάσεων επίπεδο. Συγκεκριμένα, αναφέρεται το επίπεδο (δυο διαστάσεις) και όχι ο χώρος (τρεις διαστάσεις) για δύο λόγους:

Ο πρώτος λόγος αφορά στην υλοποίηση των μετρικών αποστάσεων στον αλγόριθμο και το λογισμικό **OptEval** σε δύο διαστάσεις για λόγους απλότητας και ο δεύτερος λόγος είναι το γεγονός ότι η τρίτη διάσταση (υψόμετρο) αποτελεί σημαντικό ρόλο σε ορισμένες μόνο περιπτώσεις. Για παράδειγμα, όταν η περιοχή μελέτης παρουσιάζει μεγάλες υψομετρικές διαφορές με αποτέλεσμα η απόσταση δύο σημείων στο χώρο να παρουσιάζει σημαντική διαφορά από τη προβολή της στο επίπεδο. Αυτό έχει ως συνέπεια να μην είναι αντιπροσωπευτική η χωροθέτηση των αισθητήρων που προκύπτει από το λογισμικό και το γεγονός ότι πρέπει να ληφθεί υπόψη η διαφορετική πλέον γεωμετρία εξάπλωσης του σήματος των αισθητήρων που μέχρι τώρα θεωρείται ως κύκλος με κέντρο τον αισθητήρα και ακτίνα την εμβέλεια του αισθητήρα.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η συμπεριφορά του λογισμικού για κατανομές σημείων στο επίπεδο θεωρώντας αμελητέες τις υψομετρικές τους διαφορές.

### 2.1.2 Διασπορά κατανομής σημείων (M)

Στη συνέχεια, ορίζεται η δεύτερη παράμετρος που καθορίζει τις εν λόγω κατανομές. Πρόκειται για την διασπορά των σημείων, η οποία προκύπτει από την ελάχιστη επιτρεπόμενη απόσταση των σημείων της περιοχής μελέτης. Επεξηγηματικά, η παράμετρος αυτή δεν μπορούσε να θεωρηθεί μέχρι τώρα ως χαρακτηριστικό του εξεταζόμενου νέφους σημείων, σε αντίθεση με τον αριθμό των σημείων που πάντα είναι γνωστό. Για την υλοποίηση νέφους τυχαίων σημείων κατασκευάστηκε λογισμικό στο πλαίσιο αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας, το οποίο αναλύεται εκτενέστερα παρακάτω.



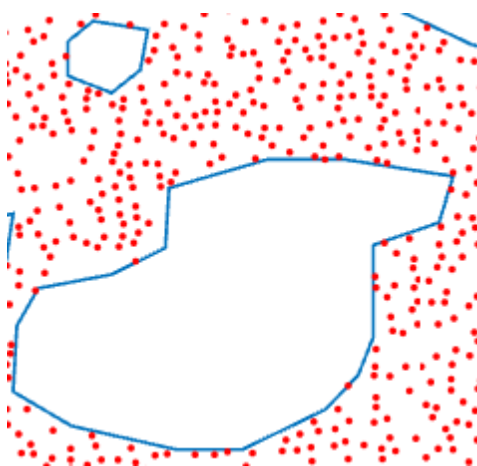
Το μέγεθος αυτό είναι σημαντικό γιατί όσο μεγαλώνει η διασπορά και μικραίνει το ποσοστό κάλυψης της περιοχής μελέτης, τόσο πιο ακραία θεωρείται η εξεταζόμενη κατανομή σημείων, την οποία καλείται το λογισμικό **OptEval** να επιλύσει.

## 2.2 Θεωρητικό υπόβαθρο υλοποίησης των κατανομών τυχαίων σημείων

Όλα τα παραπάνω οδηγούν σε ένα συμπέρασμα. Για να προκύψουν δεδομένα τέτοιας μορφής, απαιτούνται μετρήσεις στο πεδίο πράγμα που συνεπάγεται κόστος σε χρήμα και χρόνο με αποτέλεσμα να αστοχήσει η συγκεκριμένη μελέτη. Για το λόγο αυτό, αποφασίζεται α) να δημιουργηθούν σενάρια συνόλων τυχαίων σημείων που να προσεγγίζουν τη πραγματικότητα και β) να χρησιμοποιηθούν και δύο πραγματικά σενάρια από την αποτύπωση του δικτύου στύλων οδοφωτισμού του Δήμου Τρίπολης.

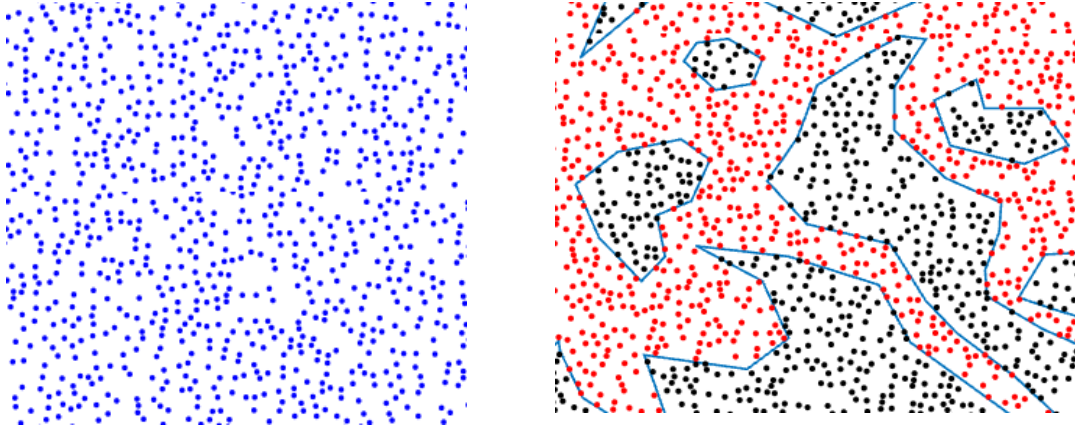
Για τα σενάρια αυτά, επιβάλλεται να διατηρηθούν σταθερές κάποιες παράμετροι και να είναι μεταβλητές μόνο η *πυκνότητα* και η *διασπορά* ώστε να είναι αξιολογήσιμα τα τελικά αποτελέσματα. Αποφασίζεται η περιοχή μελέτης να έχει σταθερές διαστάσεις 2000 x 2000 (οι μονάδες μέτρησης δεν έχουν σημασία) και το ποσοστό κάλυψης καθώς και η ελάχιστη απόσταση των σημείων να αλλάζουν με ίδιο τρόπο στις υποπεριπτώσεις κάθε σεναρίου. 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. Αποφασίζεται οι περιοχές αυτές να απεικονίζονται ως πολύγωνα εντός της περιοχής μελέτης, όπου ανάλογα με το σενάριο θα επιτρέπεται η τοποθέτηση σημείων μόνο εντός ή μόνο εκτός αυτών.

Οι κατηγορίες των σεναρίων που δημιουργούνται (εξαιρώντας τα δεδομένα της Τρίπολης) είναι τέσσερις. Οι δύο αφορούν σε προσομοίωση δάσους (FOREST), ενώ οι άλλες δύο παρουσιάζουν τη μορφή πόλης (CITY). Η διαφορά των σεναρίων FOREST A από αυτά των FOREST B είναι ότι δημιουργούνται **N** σημεία που δεν ανήκουν σε πολύγωνα (νεκρές ζώνες εντός της περιοχής μελέτης) και οι τελικές δυνατές θέσεις είναι **N**.



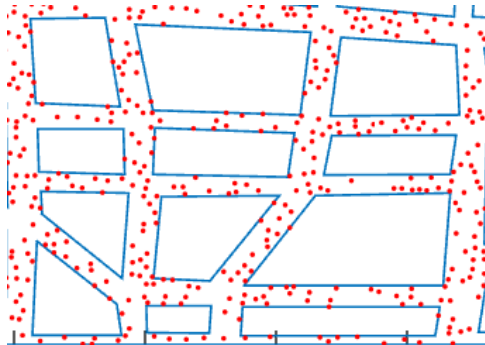
Εικόνα 2.5: Σκαρίφημα απεικόνισης περίπτωσης τύπου FOREST A

Αντίθετα, στα σενάρια FOREST B δημιουργούνται  $N$  σημεία σε όλη τη περιοχή μελέτης και στη συνέχεια αφαιρούνται τα σημεία που ανήκουν εντός των πολύγωνων. Τελικά, προκύπτουν  $N' < N$  δυνατές θέσεις τοποθέτησης αισθητήρων, το πλήθος των οποίων δεν είναι γνωστό όπως στα σενάρια FOREST A.



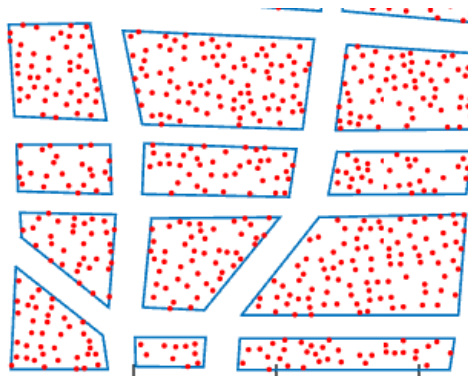
Εικόνα 2.6: Σκαριφήματα απεικόνισης περίπτωσης τύπου FOREST B  
Αρχικά σημεία – σημεία μετά την αφαίρεση

Εν συνεχεία, στα σενάρια CITY A επιτρέπεται η ύπαρξη σημείων μόνο **εκτός** των οικοδομικών τετραγώνων, όπου θα μπορούσαν να συμβολίζουν δίκτυο οδοφωτισμού.



Εικόνα 2.7: Σκαρίφημα απεικόνισης περίπτωσης τύπου CITY A

Αντίθετα, στα σενάρια CITY B επιτρέπεται η ύπαρξη σημείων μόνο **εντός** των οικοδομικών τετραγώνων, όπου θα μπορούσαν να είναι θέσεις στις ταράτσες κτηρίων.



Εικόνα 2.8: Σκαρίφημα απεικόνισης περίπτωσης τύπου CITY B

Στους παρακάτω πίνακες δίνονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του κάθε σεναρίου. Επιπλέον, αναλύεται η σημασιολογία της κάθε στήλης και η διαδικασία που προκύπτει.

SCENARIO		OPEN AREA	COVERED AREA	MIN DISTANCE	MAX POINTS	DIV	N
<b>FOREST_A</b>		<b>2.000</b>	<b>2.000</b>		4.000.000		
FA0	1	0%	4.000.000	<b>1</b>	4.000.000	5	<b>800.000</b>
	2	0%	4.000.000	<b>5</b>	160.000	5	<b>32.000</b>
	3	0%	4.000.000	<b>10</b>	40.000	5	<b>8.000</b>
	4	0%	4.000.000	<b>20</b>	10.000	5	<b>2.000</b>
	5	0%	4.000.000	<b>40</b>	2.500	5	<b>500</b>
FA1	1	20%	3.200.000	<b>1</b>	3.200.000	5	<b>640.000</b>
	2	20%	3.200.000	<b>5</b>	128.000	5	<b>25.600</b>
	3	20%	3.200.000	<b>10</b>	32.000	5	<b>6.400</b>
	4	20%	3.200.000	<b>20</b>	8.000	5	<b>1.600</b>
	5	20%	3.200.000	<b>40</b>	2.000	5	<b>400</b>
FA2	1	40%	2.400.000	<b>1</b>	2.400.000	5	<b>480.000</b>
	2	40%	2.400.000	<b>5</b>	96.000	5	<b>19.200</b>
	3	40%	2.400.000	<b>10</b>	24.000	5	<b>4.800</b>
	4	40%	2.400.000	<b>20</b>	6.000	5	<b>1.200</b>
	5	40%	2.400.000	<b>40</b>	1.500	5	<b>300</b>
FA3	1	60%	1.600.000	<b>1</b>	1.600.000	5	<b>320.000</b>
	2	60%	1.600.000	<b>5</b>	64.000	5	<b>12.800</b>
	3	60%	1.600.000	<b>10</b>	16.000	5	<b>3.200</b>
	4	60%	1.600.000	<b>20</b>	4.000	5	<b>800</b>
	5	60%	1.600.000	<b>40</b>	1.000	5	<b>200</b>
FA4	1	80%	800.000	<b>1</b>	800.000	5	<b>160.000</b>
	2	80%	800.000	<b>5</b>	32.000	5	<b>6.400</b>
	3	80%	800.000	<b>10</b>	8.000	5	<b>1.600</b>
	4	80%	800.000	<b>20</b>	2.000	5	<b>400</b>
	5	80%	800.000	<b>40</b>	500	5	<b>100</b>

*Πίνακας 2.1: Σενάρια που προσομοιάζουν δάσος και η δημιουργία τους γίνεται με την διαδικασία A*

SCENARIO		OPEN AREA	COVERED AREA	MIN DISTANCE	MAX POINTS	DIV	N
<b>FOREST_B</b>		<b>2.000</b>	<b>2.000</b>		4.000.000		
FB0	1	0%	4.000.000	<b>1</b>	4.000.000	3	<b>1.333.333</b>
	2	0%	4.000.000	<b>5</b>	160.000	3	<b>53.333</b>
	3	0%	4.000.000	<b>10</b>	40.000	3	<b>13.333</b>
	4	0%	4.000.000	<b>20</b>	10.000	3	<b>3.333</b>
	5	0%	4.000.000	<b>40</b>	2.500	3	<b>833</b>
FB1	1	20%	3.200.000	<b>1</b>	3.200.000	3	<b>1.066.667</b>
	2	20%	3.200.000	<b>5</b>	128.000	3	<b>42.667</b>
	3	20%	3.200.000	<b>10</b>	32.000	3	<b>10.667</b>
	4	20%	3.200.000	<b>20</b>	8.000	3	<b>2.667</b>
	5	20%	3.200.000	<b>40</b>	2.000	3	<b>667</b>
FB2	1	40%	2.400.000	<b>1</b>	2.400.000	3	<b>800.000</b>
	2	40%	2.400.000	<b>5</b>	96.000	3	<b>32.000</b>
	3	40%	2.400.000	<b>10</b>	24.000	3	<b>8.000</b>
	4	40%	2.400.000	<b>20</b>	6.000	3	<b>2.000</b>
	5	40%	2.400.000	<b>40</b>	1.500	3	<b>500</b>
FB3	1	60%	1.600.000	<b>1</b>	1.600.000	3	<b>533.333</b>
	2	60%	1.600.000	<b>5</b>	64.000	3	<b>21.333</b>
	3	60%	1.600.000	<b>10</b>	16.000	3	<b>5.333</b>
	4	60%	1.600.000	<b>20</b>	4.000	3	<b>1.333</b>
	5	60%	1.600.000	<b>40</b>	1.000	3	<b>333</b>
FB4	1	80%	800.000	<b>1</b>	800.000	3	<b>266.667</b>
	2	80%	800.000	<b>5</b>	32.000	3	<b>10.667</b>
	3	80%	800.000	<b>10</b>	8.000	3	<b>2.667</b>
	4	80%	800.000	<b>20</b>	2.000	3	<b>667</b>
	5	80%	800.000	<b>40</b>	500	3	<b>167</b>

*Πίνακας 2.2: Σενάρια που προσομοιάζουν δάσος και η δημιουργία τους γίνεται με την διαδικασία B*

SCENARIO		OPEN AREA	COVERED AREA	MIN DISTANCE	MAX POINTS	DIV	N
<b>CITY_A</b>		<b>2.000</b>	<b>2.000</b>		4.000.000		
CA1	1	70%	1.200.000	<b>5</b>	48.000	5	<b>9.600</b>
	2	70%	1.200.000	<b>10</b>	12.000	5	<b>2.400</b>
	3	70%	1.200.000	<b>20</b>	3.000	5	<b>600</b>
	4	70%	1.200.000	<b>40</b>	750	5	<b>150</b>
	5	70%	1.200.000	<b>80</b>	185	5	<b>37</b>
CA2	1	85%	600.000	<b>5</b>	24.000	5	<b>4.800</b>
	2	85%	600.000	<b>10</b>	6.000	5	<b>1.200</b>
	3	85%	600.000	<b>20</b>	1.500	5	<b>300</b>
	4	85%	600.000	<b>40</b>	375	5	<b>75</b>
	5	85%	600.000	<b>80</b>	90	5	<b>18</b>

Πίνακας 2.3: Σενάρια που προσομοιάζουν **πόλη**, δημιουργημένα με την διαδικασία **A**

SCENARIO		OPEN AREA	COVERED AREA	MIN DISTANCE	MAX POINTS	DIV	N
<b>CITY_B</b>		<b>2.000</b>	<b>2.000</b>		4.000.000		
CB1	1	30%	2.800.000	<b>5</b>	112.000	5	<b>22.400</b>
	2	30%	2.800.000	<b>10</b>	28.000	5	<b>5.600</b>
	3	30%	2.800.000	<b>20</b>	7.000	5	<b>1.400</b>
	4	30%	2.800.000	<b>40</b>	1.750	5	<b>350</b>
	5	30%	2.800.000	<b>80</b>	435	5	<b>87</b>
CB2	1	15%	3.400.000	<b>5</b>	136.000	5	<b>27.200</b>
	2	15%	3.400.000	<b>10</b>	34.000	5	<b>6.800</b>
	3	15%	3.400.000	<b>20</b>	8.500	5	<b>1.700</b>
	4	15%	3.400.000	<b>40</b>	2.125	5	<b>425</b>
	5	15%	3.400.000	<b>80</b>	530	5	<b>106</b>

Πίνακας 2.4: Σενάρια που προσομοιάζουν **πόλη**, δημιουργημένα με την διαδικασία **B**

<b>CITY_C</b>		N
Δοσμένα σημεία από πραγματικά δεδομένα στηλών οδοφωτισμού		<b>N</b>
CC1-1	Δήμος Τρίπολης, Δ.Ε. Τρίπολης	4523
CC2-1	Δήμος Τρίπολης, σύνολο Καλλικρατικού Δήμου	12773

Πίνακας 2.5: Σενάρια που αποτελούνται από δοσμένα σύνολα σημείων

Ως «**OPEN AREA**» ορίζεται το συνολικό εμβαδό της περιοχής μελέτης όπου απαγορεύεται η ύπαρξη σημείων. Επιπρόσθετα, με τον όρο «**COVERED AREA**» ορίζεται το συνολικό εμβαδό της περιοχής μελέτης όπου επιτρέπεται η ύπαρξη σημείων. Η διασπορά και το πλήθος των σημείων κατανομής του κάθε σεναρίου δίνεται από τις στήλες «**MIN DISTANCE**» και «**N**» αντίστοιχα. Με τον όρο «**MAX POINTS**» δίνεται ο μέγιστος αριθμός σημείων που μπορεί να υλοποιηθεί στην κάθε περιοχή μελέτης, λαμβάνοντας υπόψιν το ποσοστό κάλυψης του κάθε σεναρίου. Με βάση αυτό προκύπτει το τελικό πλήθος των σημείων κάθε περίπτωσης, όπου πάντα είναι το 1/5 (**DIV**) των εφικτών θέσεων τοποθέτησης σημείων.

Πολύ σημαντικό κομμάτι αποτελεί και η κωδικοποίηση των σεναρίων, διότι οι περιπτώσεις είναι 70 στο σύνολό τους, εξαιρώντας τα δοσμένα δεδομένα της Τρίπολης. Αυτό συνεπάγεται πολλά αποτελέσματα και αρχεία εισόδου και εξόδου του λογισμικού **OptEval**. Επίσης, όλα τα αποτελέσματα οπτικοποιούνται και οι εικόνες έχουν ως τίτλο τον κωδικό του αντίστοιχου σεναρίου.

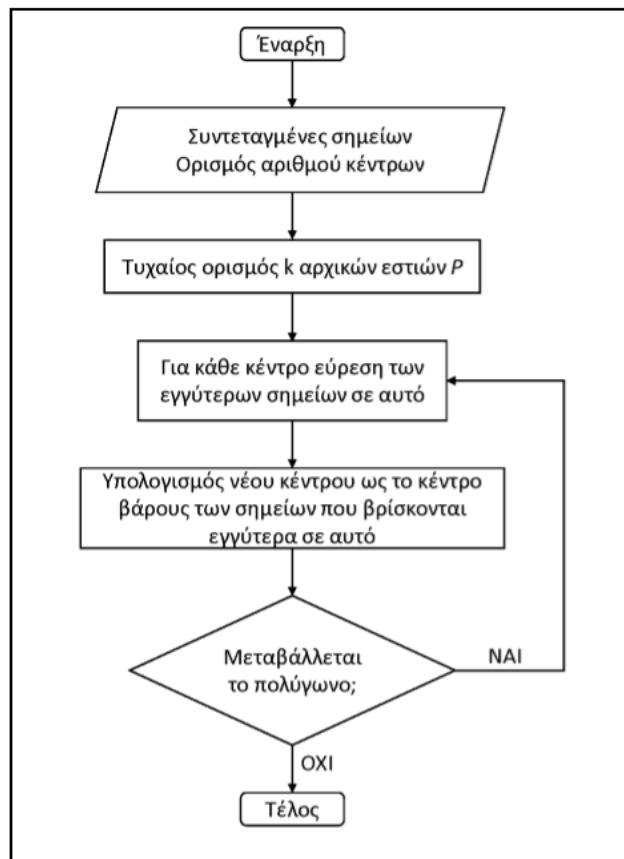
Τέλος, αναφέρεται ότι στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας συντάσσεται λογισμικό, εκ νέου στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab, το οποίο δημιουργεί τα σενάρια που θα αποτελέσουν τις κατανομές σημείων εξέτασης των αποτελεσμάτων του λογισμικού **OptEval** και δέχεται ως παραμέτρους όσα αναφέρθηκαν παραπάνω.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ OptEval

#### 3.1 Αξιολόγηση κριτηρίου σύγκλισης (θεωρητικές θέσεις αισθητήρων)

Ξεκινώντας, αναφέρεται ότι το λογισμικό **OptEval** εκτελεί μια ρουτίνα βασισμένη στον αλγόριθμο του **Lloyd** για κατασκευή των CVT (*Centroidal Voronoi Tessellations*). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος με τον οποίο δομείται η κεντροειδής διαμέριση Voronoi 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]

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 κέντρα βάρους να είναι μικρότερη από ένα προκαθορισμένο κατώφλι (όριο). Το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου του **Lloyd** απεικονίζεται στο σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής αλγόριθμου Lloyd για κατασκευή CVT

Το λογισμικό **OptEval** προσεγγίζει τη βέλτιστη λύση σε δύο στάδια:

- Αρχικά προσδιορίζει τις βέλτιστες θεωρητικές θέσεις των γεωαισθητήρων, όπως αυτές προκύπτουν για τη συγκεκριμένη γεωμετρία.
- Κατόπιν βρίσκει τις πραγματικές θέσεις εγκατάστασης, με μετατόπιση της θεωρητικής θέσης στην πλησιέστερη υπαρκτή θέση.

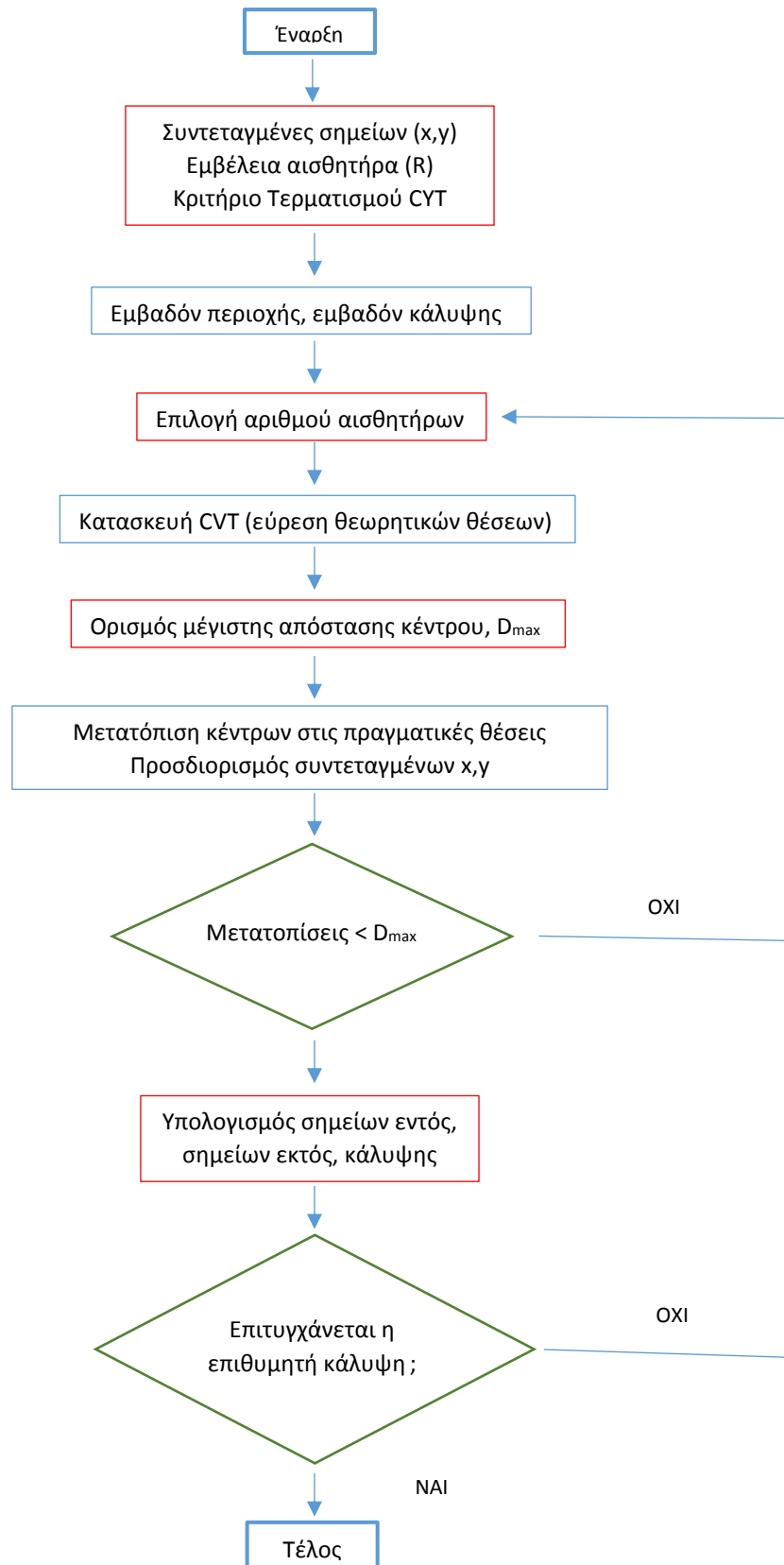
Με βάση τα παραπάνω δίνεται το διάγραμμα ροής του λογισμικού **OptEval** για τη χωροθέτηση των σημείων ενδιαφέροντος, στο σχήμα 3.2.

Κατά τη δημιουργία του λογισμικού **OptEval**, πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση του αλγορίθμου. Για την επίτευξη αυτού προτάθηκαν και ερευνήθηκαν ορισμένες μετρικές και με τη χρήση κριτηριακής ανάλυσης επιλέχθηκε ως κατάλληλότερη μετρική αξιολόγησης η τριγωνοποίηση του συνόλου των σημείων, τα οποία αντιστοιχούν στις τελικές θέσεις τοποθέτησης αισθητήρων μέσω του τριγωνισμού **Delaunay**.

Το λογισμικό **OptEval** χρησιμοποιεί ορισμένα από τα υπαρκτά υπονήφια σημεία χωροθέτησης αισθητήρων (των αριθμό των οποίων καθορίζει ο χρήστης του λογισμικού) ως αρχικές θέσεις του αλγόριθμου. Μετέπειτα, πραγματοποιεί μια σειρά επαναλήψεων (ο αριθμός των οποίων καθορίζεται από το χρήστη του λογισμικού) μέσω των οποίων δημιουργεί νέες **θεωρητικές θέσεις** τοποθέτησης αισθητήρων που τείνουν να προσεγγίσουν την ορθότερη γεωμετρία, ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη κάλυψη του οριοθετημένου χώρου ενδιαφέροντος. Με το πέρας των επαναλήψεων από τις τελικές βέλτιστες θεωρητικές θέσεις, βρίσκεται η κοντινότερη υπαρκτή θέση. Έτσι, υπολογίζονται οι τελικές πραγματικές θέσεις.

Η μεθοδολογία αυτή κάνει υπολογισμούς οι οποίοι χρησιμοποιούν μη υπαρκτές θέσεις και τελικά επιχειρεί να απεικονίσει τη θεωρητική λύση σε πραγματική θέση, με αποτέλεσμα να υπάρχει δικαιολογημένη διαισθητική αμφιβολία για το αν τελικό αποτέλεσμα της χωροθέτησης είναι το καλύτερο εφικτό.





Σχήμα 3.2: Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας χωροθέτησης

### 3.2 Προτεινόμενο κριτήριο σύγκλισης (πραγματικές θέσεις αισθητήρων)

Στο πλαίσιο της παρούσας προσέγγισης πραγματοποιούνται όσο το δυνατόν περισσότεροι υπολογισμοί με πραγματικές θέσεις τοποθέτησης των αισθητήρων και όχι στις θεωρητικές. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μιας τροποποίησης, όπου μετά από τον υπολογισμό των θεωρητικών θέσεων χωροθέτησης ανά επανάληψη, βρίσκονται και οι πραγματικές θέσεις. Οι πραγματικές θέσεις βρίσκονται με την ίδια διαδικασία που έχει οριστεί εξ αρχής στο λογισμικό, δηλαδή για κάθε θεωρητική θέση βρίσκεται το κοντινότερο υπαρκτό σημείο σε αυτή, το οποίο αποτελεί πραγματική (εφικτή) θέση χωροθέτησης.

Μέσω αυτής της τροποποίησης εντοπίζονται λύσεις μέσω του **OptEval** βασιζόμενοι κυρίως στα υπαρκτά σημεία του συνόλου δυνητικών θέσεων. Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να αναφερθούμε στη μετρική που θα χρησιμοποιήσουμε για τον υπολογισμό αποστάσεων νεφών σημείων.

### 3.3 Μετρική - Hausdorff distance

Με τον όρο μετρική, νοείται ένα σύνολο ποσοτικών υπολογισμών με τους οποίους ποσοτικοποιείται η αποδοτικότητα ή η επίδοση της λύσης ενός προβλήματος. Η επιλογή μιας κατάλληλης μετρικής είναι ιδιαίτερα κρίσιμη παράμετρος στην αξιολόγηση της λύσης, καθώς είναι αυτή που τελικά θα προκρίνει τη μία λύση έναντι της άλλης. Μία λανθασμένη επιλογή μετρικής πιθανότατα θα οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα ως προς την αποδοτικότητα κάθε λύσης.

Επειδή, ο αλγόριθμος εξετάζει πλήθος σημείων στο επίπεδο, ένα εύλογο κριτήριο αφορά στο κατά πόσο μετατοπίζονται οι θέσεις των επιλεγμένων σημείων (θεωρητικές ή πραγματικές) ανά επανάληψη. Για αυτό χρειάζεται μια μετρική, η οποία υπολογίζει την απόσταση μεταξύ δύο συνόλων σημείων. Η εν λόγω μετρική ονομάζεται «**Hausdorff distance**» και δεν έχει μέχρι τώρα χρησιμοποιηθεί από τον αλγόριθμο.

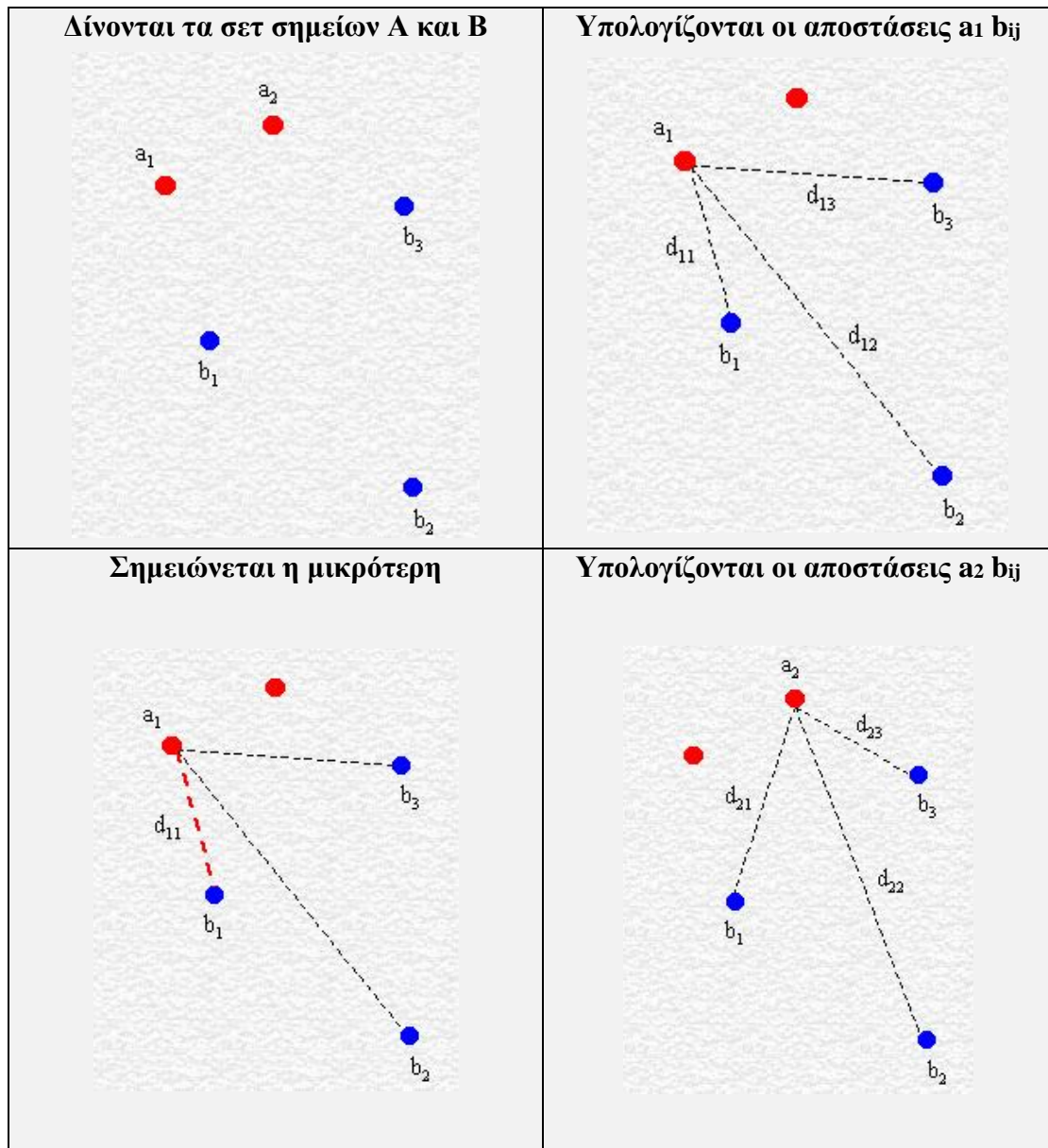
Στα μαθηματικά, η απόσταση Hausdorff, ή η μετρική Hausdorff, που ονομάζεται επίσης απόσταση Pompeiu-Hausdorff, μετρά πόσο απέχουν δύο υποσύνολα ενός μετρικού χώρου το ένα από το άλλο. Ονομάστηκε από τον Felix Hausdorff.

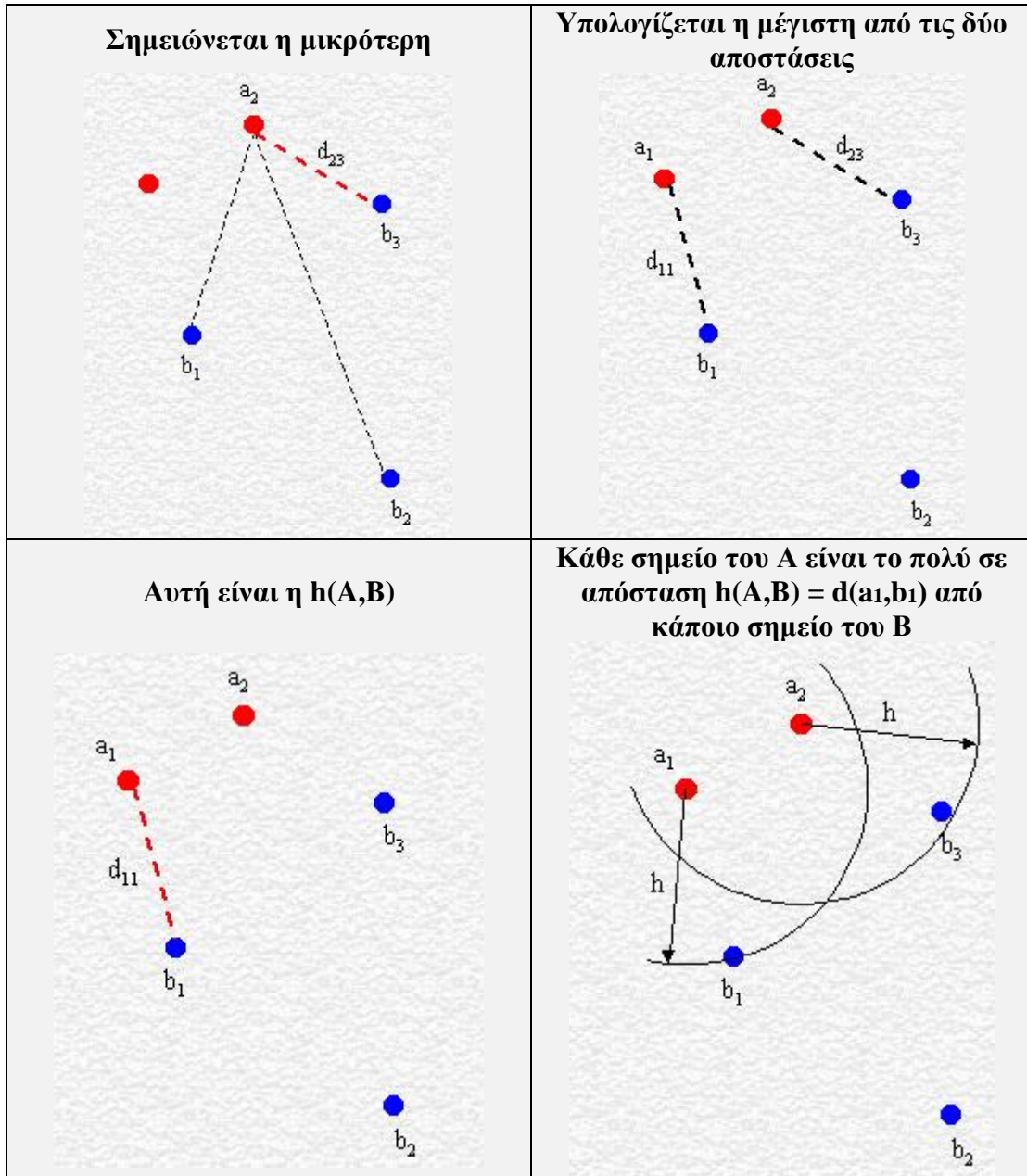
Ανεπίσημα, δύο σύνολα είναι κοντά στην απόσταση Hausdorff αν κάθε σημείο του ενός συνόλου είναι κοντά σε κάποιο σημείο του άλλου συνόλου. Η απόσταση Hausdorff είναι η μεγαλύτερη από όλες τις αποστάσεις από ένα σημείο σε ένα νέφος σημείων στο πλησιέστερο σημείο του άλλου νέφους σημείων, και περιγράφεται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

$$d_H(X, Y) = \max \left\{ \sup_{x \in X} \inf_{y \in Y} d(x, y), \sup_{y \in Y} \inf_{x \in X} d(x, y) \right\}$$

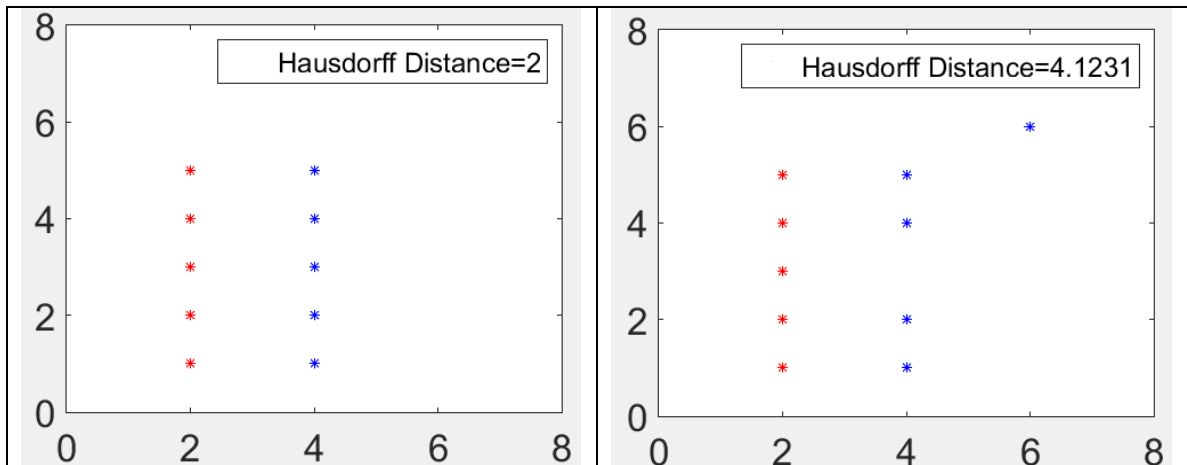
Με την συγκεκριμένη μετρική μπορεί να καταγραφεί το πόσο αλλάζουν οι θέσεις τοποθέτησης αισθητήρων σε κάθε επανάληψη και να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο σύγκλισης του αλγορίθμου. Το ιδανικότερο σενάριο είναι αυτό, όπου η **Hausdorff distance** μηδενίζεται. Αυτόματα γίνεται γνωστό ότι όσες επαναλήψεις ακολουθήσουν δεν θα βρεθεί καλύτερη λύση στο πρόβλημα της χωροθέτησης με την προϋπόθεση ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει. Θεωρητικά, ο αλγόριθμος **Lloyd** είναι σχεδιασμένος να συγκλίνει πάντα. Παρόλα αυτά μέσω της εφαρμογής της **Hausdorff distance** θα γίνει επαλήθευση και αυτής της προϋπόθεσης, η οποία θεωρείται δεδομένη μέχρι τώρα στην λειτουργία του λογισμικού **OptEval**. Αναφέρεται ότι χρησιμοποιήθηκε η έτοιμη υλοποίηση της Matlab για τον υπολογισμό της **Hausdorff distance**.

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

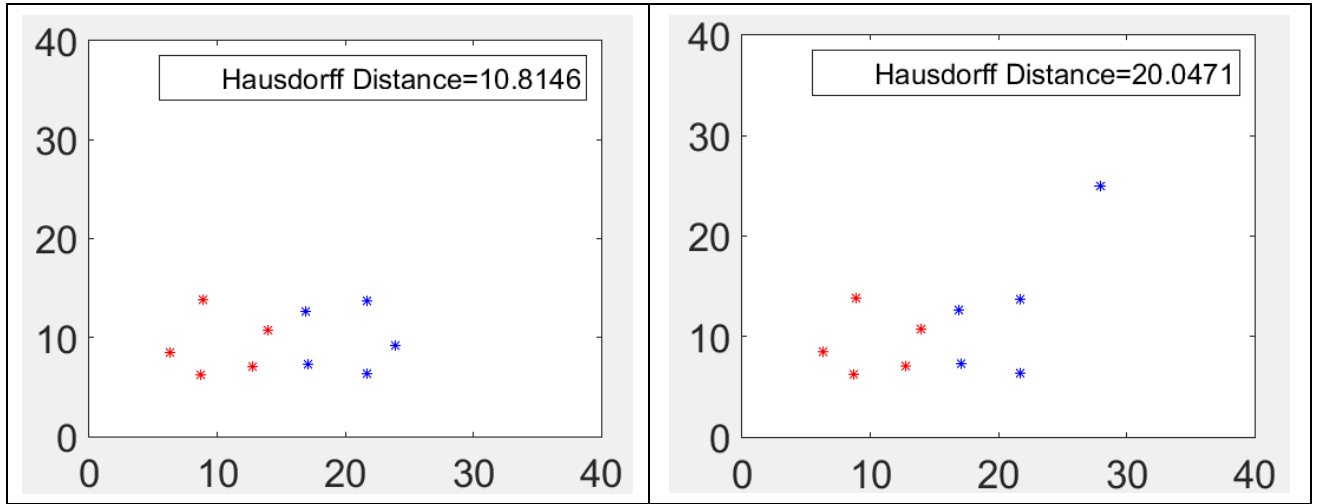




Σχήμα 3.3: Επεξήγηση της **Hausdorff distance**



Σχήμα 3.4: Υπολογισμός **Hausdorff distance** για σελ σημείων που ανήκουν σε ευθείες



Σχήμα 3.5: Υπολογισμός *Hausdorff distance* για σελ σημείων που ανήκουν σε κύκλους



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ

#### 4.1 Το πρόβλημα εύρεσης τυχαίων σημείων

Στο πλαίσιο αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας, είναι κρίσιμο να διαπιστωθεί πως αντιδρά ο αλγόριθμος του **OptEval** σε μια σειρά περιπτώσεων με βασικότερες το μεγάλο πλήθος σημείων και την ελάχιστη απόστασή τους. Στο κεφάλαιο 2 αναφέρθηκαν αναλυτικά τα σενάρια που επιλέχθηκαν για τη μελέτη αυτή.

Το δύσκολο μέρος της όλης διαδικασίας, είναι η εύρεση συνόλων σημείων με τα χαρακτηριστικά που περιγράφονται στους πίνακες 2.1,2.2,2.3 και 2.4. Έχοντας μόνο δύο υαρκτά σενάρια από τον οδοφωτισμό της Τρίπολης (το κόστος δημιουργίας των οποίων επιβάρυνε το Δήμο) η μελέτη θα ήταν υποτυπώδης. Για το λόγο αυτό, αποφασίστηκε η δημιουργία ενός νέου λογισμικού με τον συγκεκριμένο ρόλο. Την παραγωγή τυχαίων σημείων που να διέπουν τις επιθυμητές συνθήκες για την πειραματική εκτέλεση του αλγορίθμου.

#### 4.2 Χρήση περιβάλλοντος gis για τη δημιουργία νεκρών ζωνών

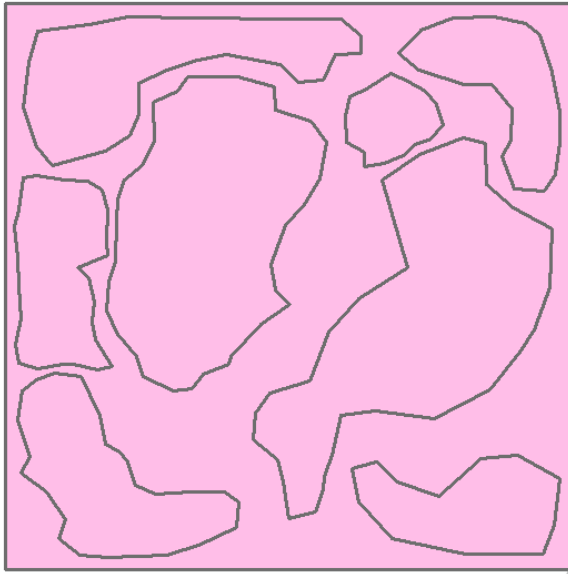
Σε πρώτη φάση έπρεπε να δημιουργηθούν οι νεκρές ζώνες των FOREST όπου δεν επιτρέπεται η ύπαρξη σημείων, καθώς και τα οικοδομικά τετράγωνα των CITY A και B. Χρησιμοποιήθηκε το «ArcGIS» για τη δημιουργία των εν λόγω πολυγώνων, εντός επιπέδου 2000 x 2000. Για τα FOREST υλοποιήθηκαν 4 σενάρια πολυγώνων που διέποντας από τις απαιτούμενες συνθήκες κάλυψης του επιπέδου ενδιαφέροντος.



Εικόνα 4.1: Πολύγωνα FOREST A1 & B1



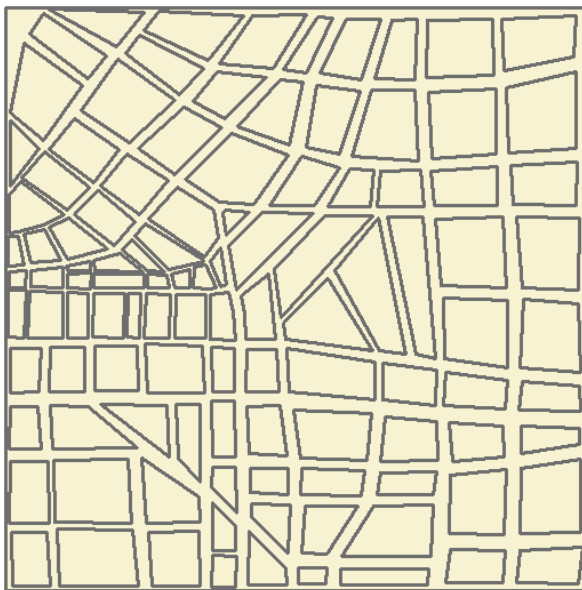
Εικόνα 4.2: Πολύγωνα FOREST A2 & B2



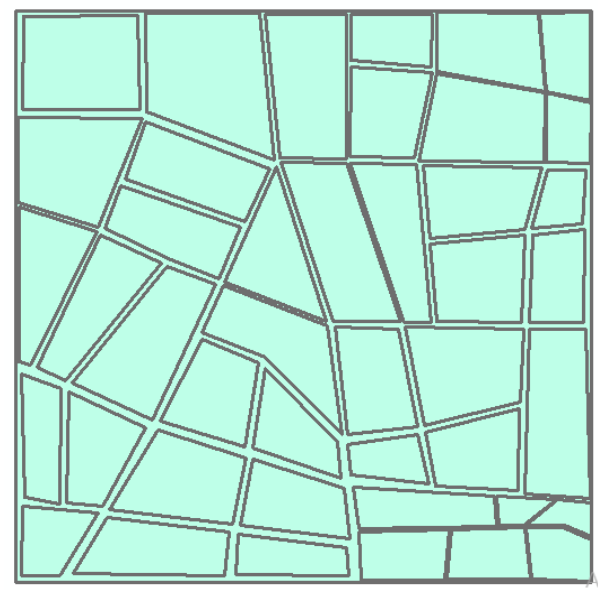
Εικόνα 4.3: Πολύγωνα FOREST A3 & B3



Εικόνα 4.4: Πολύγωνα FOREST A4 & B4



Εικόνα 4.5: Πολύγωνα CITY A1 & B1



Εικόνα 4.6: Πολύγωνα CITY A2 & B2

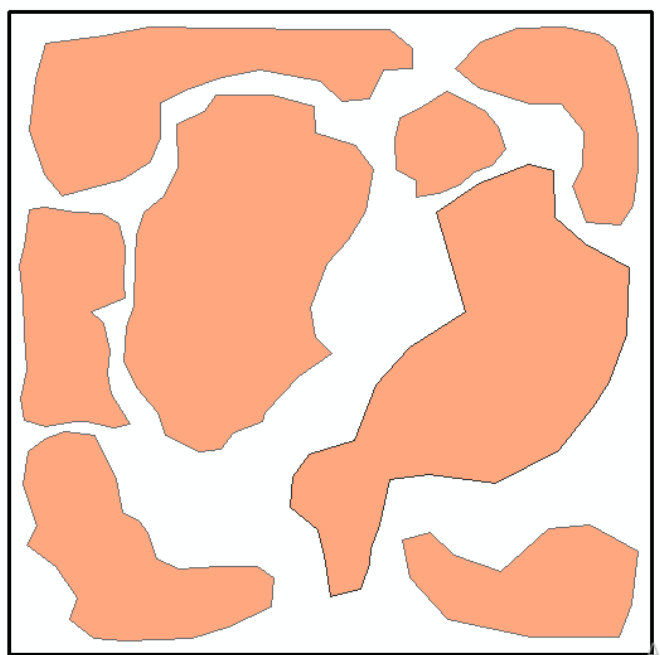
Μέσω του gis ήταν εφικτή η εξαγωγή των συντεταγμένων όλων των κορυφών των πολυγώνων αυτών. Οι συντεταγμένες αυτές είναι απαραίτητα στοιχεία εισόδου στο λογισμικό παραγωγής τυχαίων σημείων.



### 4.3 Λογισμικό παραγωγής τυχαίων σημείων

Το λογισμικό παραγωγής τυχαίων σημείων δημιουργήθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Matlab. Σκοπός του είναι η παραγωγή και καταγραφή τυχαίων σημείων στο επίπεδο σε αρχείο txt το οποίο αποτελεί στοιχείο εισόδου του λογισμικού **OptEval**. Αρχικά, η δομή του λογισμικού παραγωγής τυχαίων σημείων στηρίχτηκε στην υπολογιστική πολυπλοκότητα, το οποίο θεωρείται ορθότερο από την προγραμματιστική σκοπιά και η εκτέλεση του αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί στους υπολογιστές που βρίσκονται στο κέντρο ηλεκτρονικών υπολογιστών του Ε.Μ.Π.. Παρόλα αυτά, η εκτέλεση του πρώτου σεναρίου που έγινε δοκιμαστικά, δεν κατάφερε να ολοκληρωθεί αφού μετά από μια εβδομάδα εκτέλεσης, έγινε διακοπή του λογισμικού λόγω του χρόνου εκτέλεσης που απαιτούσε. Το εμπόδιο του μεγάλου χρόνου εκτέλεσης οδήγησε στην ανάγκη εύρεσης εναλλακτικής δομής λειτουργίας. Ως αποτέλεσμα αυτού ήταν η στροφή σε μια λύση που απαιτούσε μεγάλη ποσότητα μνήμης, με αποτέλεσμα να μπορεί να λυθεί το πρόβλημα σε πρακτικά αμελητέο χρόνο. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκε ένα συμπληρωματικό λογισμικό το οποίο δημιουργεί έναν πίνακα διαστάσεων 2000 x 2000 με τις τιμές 0 και -1, ο οποίος εισάγεται στο βασικό λογισμικό παραγωγής τυχαίων σημείων.

Η βασική συνάρτηση που δημιουργήθηκε και χρησιμοποιείται από τα δύο αυτά λογισμικά ονομάζεται «**my\_inpolygon**» και βασίζεται στην συνάρτηση του matlab `inpolygon`. Έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει πόσα σημεία βρίσκονται εντός, εκτός ή στις πλευρές ενός πολυγώνου. Στο λογισμικό αυτό χρησιμοποιήθηκε η εύρεση των σημείων **εντός** πολυγώνου. 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 πολύγωνων που δημιουργήθηκαν στο `gis` περιβάλλον.



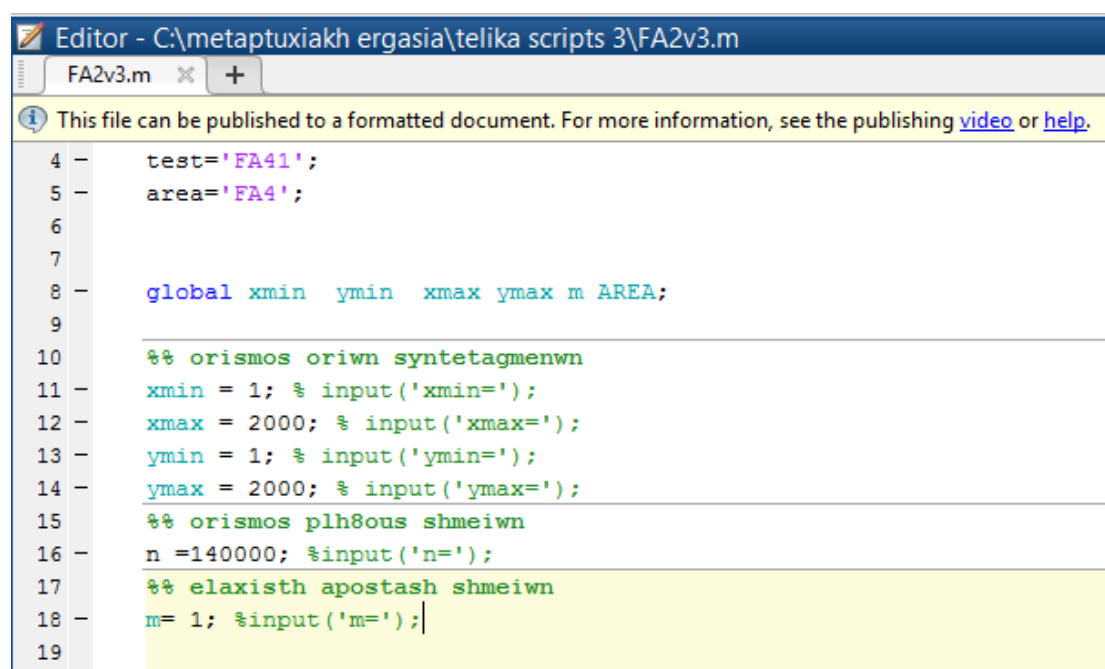
Εικόνα 4.7: Πολύγωνο λογισμικού με νεκρές ζώνες

Στην εικόνα 4.7 δίνεται ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα του πολυγώνου. Με λευκό συμβολίζεται η περιοχή που είναι πολύγωνο και με κόκκινο οι απαγορευμένες περιοχές που ανήκουν εκτός πολυγώνου. Με την βοήθεια της **my\_inpolygon** συνάρτησης δημιουργείται για κάθε σενάριο ένας πίνακας με το όνομα AREA, διαστάσεων 2000 x 2000 του οποίου τα κελιά περιέχουν την τιμή -1 στις νεκρές ζώνες και την τιμή 0 εντός του πολυγώνου.

Εν συνεχεία, ο πίνακας αυτός αποτελεί στοιχείο εισόδου στο λογισμικό παραγωγής τυχαίων σημείων. Επομένως, ως στοιχεία εισόδου του λογισμικού παραγωγής τυχαίων σημείων είναι:

- Το όνομα του σεναρίου
- Το όνομα του πίνακα AREA
- Οι διαστάσεις του επιπέδου όπου θα δημιουργηθούν τα τυχαία σημεία
- Το πλήθος των τυχαίων σημείων
- Η ελάχιστη απόσταση των τυχαίων σημείων (διασπορά)

Είναι σημαντική η ταυτοποίηση κάθε σεναρίου, πχ **FA41**, διότι βάσει αυτής ονομάζονται τα παραγόμενα αρχεία ώστε να μην υπάρξει σύγχυση στα δεδομένα εξόδου. Το όνομα του πίνακα AREA είναι συνήθως το όνομα του σεναρίου ανά περίπτωση πολυγώνου, δηλαδή **FA4**. Σε όλες τις εν λόγω περιπτώσεις οι διαστάσεις του επιπέδου κρατούνται σταθερές, ενώ το πλήθος σημείων και η ελάχιστη απόστασή τους αλλάζει ανά σενάριο.



```
Editor - C:\metaptuxiakh ergasia\telika scripts 3\FA2v3.m
FA2v3.m
This file can be published to a formatted document. For more information, see the publishing video or help.
4 - test='FA41';
5 - area='FA4';
6
7
8 - global xmin ymin xmax ymax m AREA;
9
10 %% orismos oriwn syntetagmenwn
11 - xmin = 1; % input('xmin=');
12 - xmax = 2000; % input('xmax=');
13 - ymin = 1; % input('ymin=');
14 - ymax = 2000; % input('ymax=');
15 %% orismos plh8ous shmeiwn
16 - n =140000; %input('n=');
17 %% elaxisth apostash shmeiwn
18 - m= 1; %input('m=');|
19
```

Εικόνα 4.8: Δεδομένα εισόδου του λογισμικού παραγωγής τυχαίων σημείων

Με βάση τα δεδομένα εισόδου το λογισμικό είναι προγραμματισμένο να διαβάζει και να αποθηκεύει ένα αρχείο txt με το όνομα του αντίστοιχου πίνακα AREA στον αντίστοιχο δίσκο του πίνακα AREA και ένα αρχείο txt το οποίο περιλαμβάνει τις συντεταγμένες του πολυγώνου που χαρακτηρίζει το κάθε σενάριο, αποθηκεύοντας όλες τις συντεταγμένες x στον πίνακα xv και τις συντεταγμένες y στον πίνακα yv.

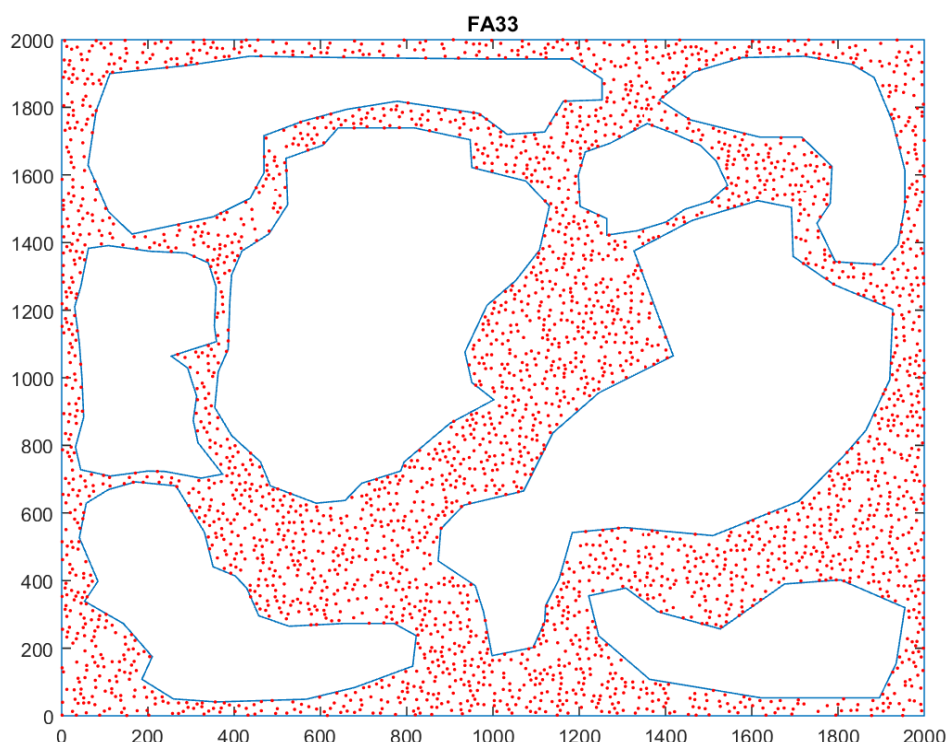
Κατά την εκτέλεση του λογισμικού παράγονται τυχαία σημεία με βάση τη συνάρτηση «**randi**» του matlab. Συγκεκριμένα, τα τυχαία σημεία που παράγονται είναι ακέραιοι αριθμοί. Δηλαδή, παράγεται ένας τυχαίος αριθμός  $x$  που ανήκει στο διάστημα  $[0,2000]$  και ένας τυχαίος αριθμός  $y$  που ανήκει ομοίως στο διάστημα  $[0,2000]$ .

Κάθε τυχαίο σημείο που δημιουργείται ελέγχεται αν υπακούει τα δύο απαραίτητα κριτήρια που επιβάλλεται από το εκάστοτε σενάριο να το χαρακτηρίζουν.

- ✚ Δεν πρέπει να εμπίπτει σε κελί του πίνακα AREA με τιμή -1
- ✚ Δεν πρέπει να απέχει από άλλο σημείο απόσταση μικρότερη από  $m$ , όπου  $m$  είναι η διασπορά κατανομής σημείων

Ο εν λόγω έλεγχος πραγματοποιείται μέσω της συνάρτησης **my\_inpolygon**. Εφόσον το παραγόμενο τυχαίο σημείο ικανοποιεί και τα δύο αυτά κριτήρια, αποθηκεύεται σε πίνακα A, ο οποίος θα περιέχει τα τελικά τυχαία σημεία του σεναρίου.

Τα επόμενα στάδια του λογισμικού αφορούν την απεικόνιση των αποτελεσμάτων, την καταγραφή των τυχαίων σημείων του πίνακα A σε αρχείο txt και τέλος την εξαγωγή των αποτελεσμάτων αυτών. Το αρχείο txt έχει το όνομα το σεναρίου που εκτελείται και περιέχει δύο στήλες. Η πρώτη στήλη περιέχει τις συντεταγμένες  $x$  και η δεύτερη στήλης τις συντεταγμένες  $y$  των τυχαίων σημείων. Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων γίνεται επίσης με εξαγωγή σε αρχείο png με το όνομα του σεναρίου.

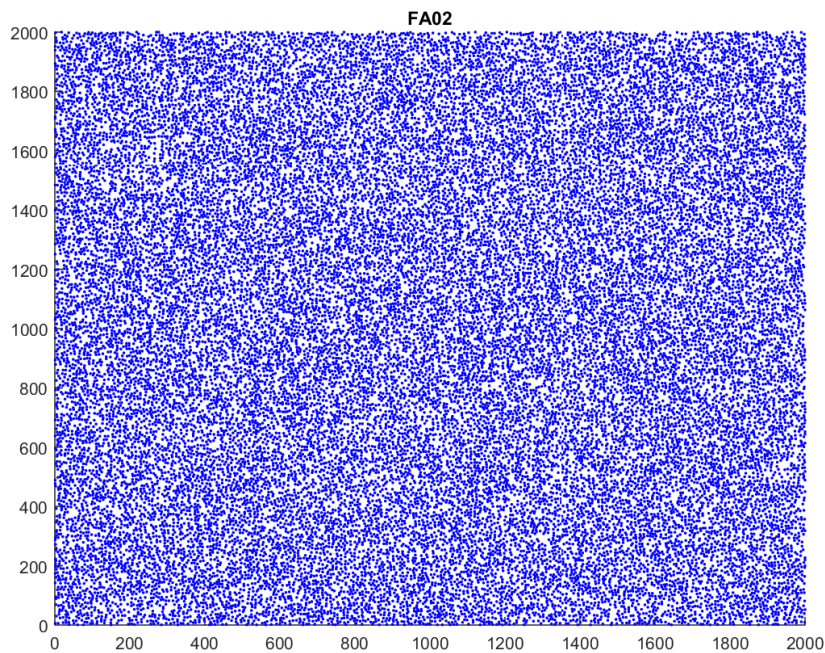


Εικόνα 4.9: Οπτικοποίηση αποτελέσματος σεναρίου FOREST A33

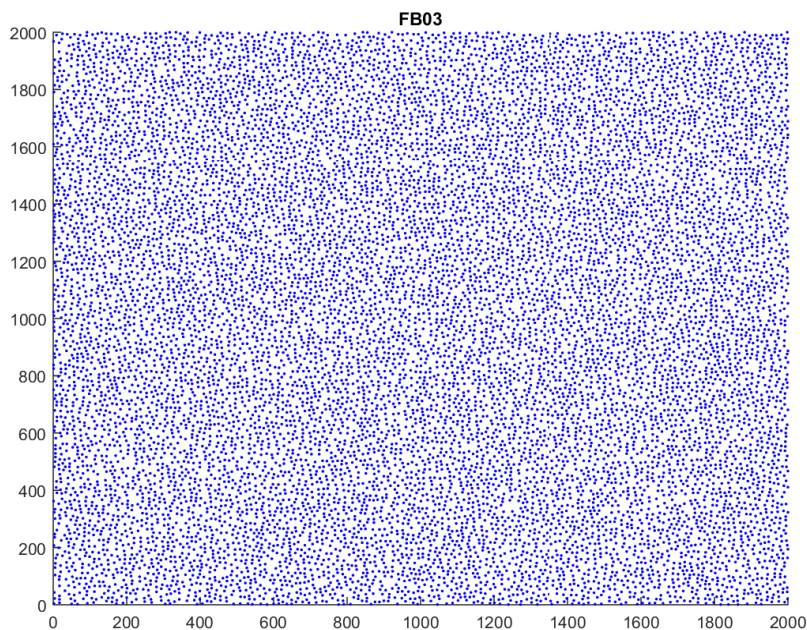
Πρέπει να αναφερθεί ότι η ποικιλομορφία των σεναρίων απαιτούσε παραλλαγές του βασικού λογισμικού παραγωγής των τυχαίων σημείων.

Παραλλαγή 1<sup>η</sup>:

Στην περίπτωση των FOREST A0 & B0 δεν υπάρχουν νεκρές ζώνες επομένως, δεν δημιουργείται πίνακας AREA και επιβάλλεται ως μοναδικό κριτήριο η ελάχιστη απόσταση των τυχαίων σημείων να μην είναι μικρότερη από την δοσμένη  $m$ .



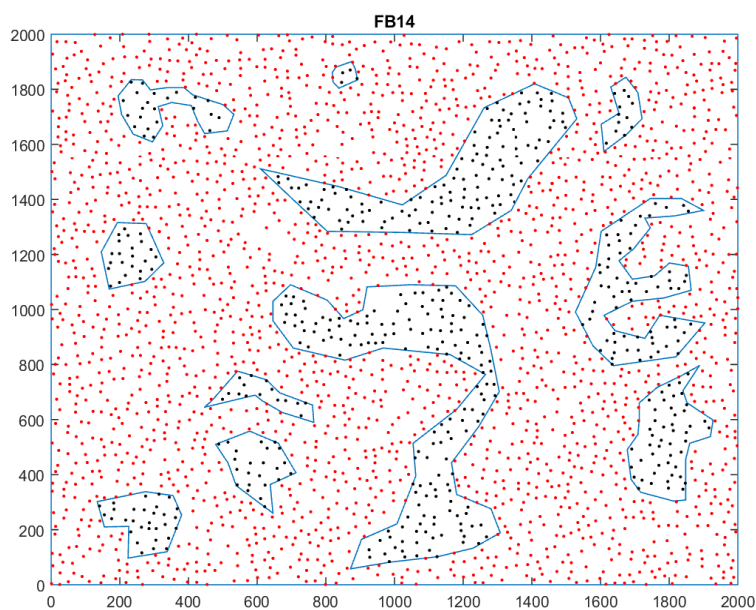
*Εικόνα 4.10: Οπτικοποίηση αποτελέσματος σεναρίου FOREST A02*



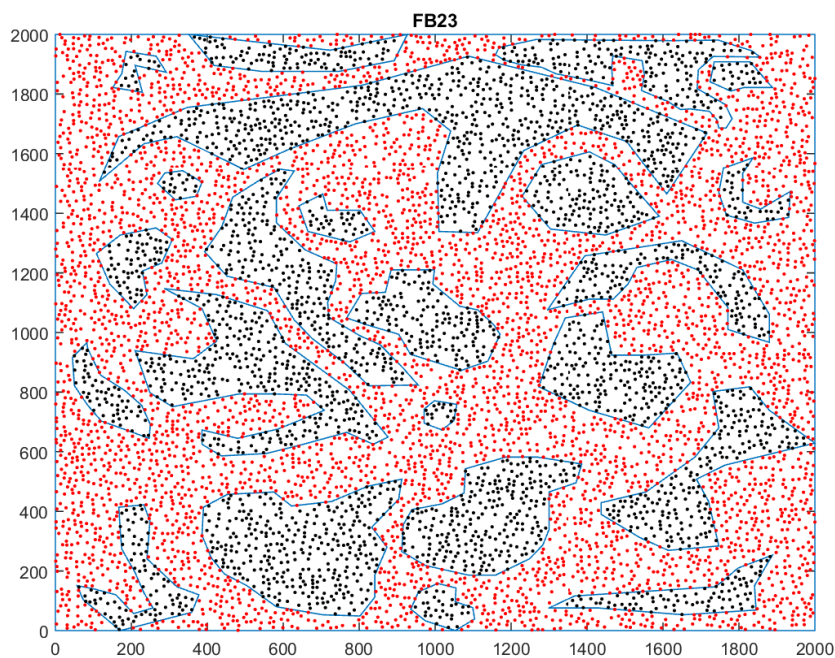
*Εικόνα 4.11: Οπτικοποίηση αποτελέσματος σεναρίου FOREST B03*

### Παραλλαγή 2<sup>η</sup>:

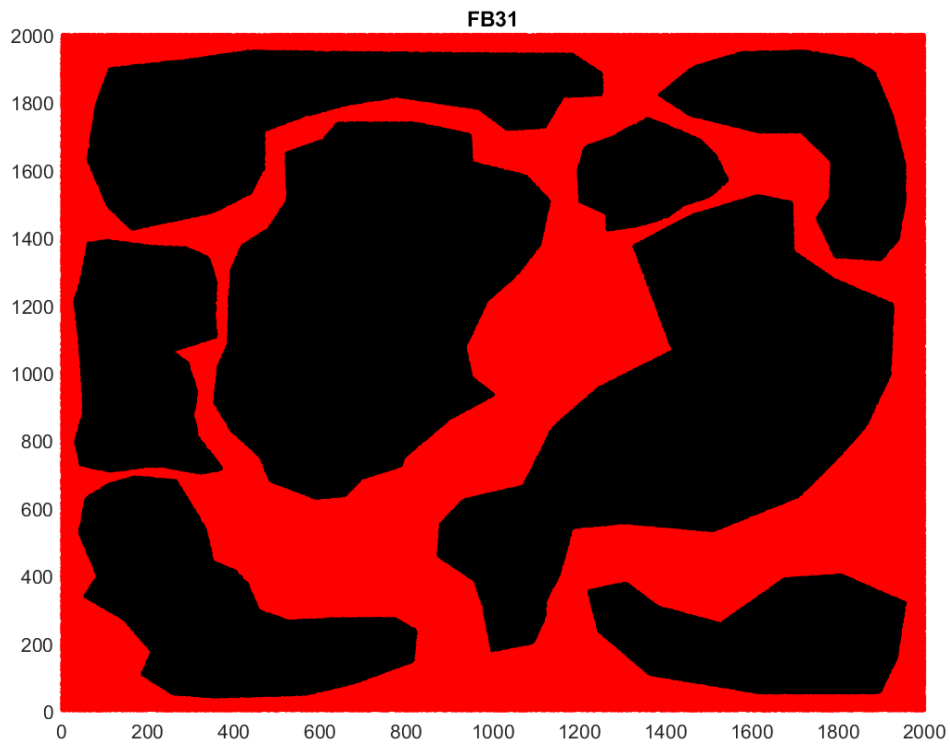
Στην περίπτωση των FOREST B1, B2, B3, & B4 ακολουθείται η διαδικασία της παραλλαγής 1 για την δημιουργία των τυχαίων σημείων. Έπειτα, εντοπίζονται ποια τυχαία σημεία εμπίπτουν σε νεκρές ζώνες και στη συνέχεια αφαιρούνται, με αποτέλεσμα να προκύπτουν τα τελικά τυχαία σημεία ενδιαφέροντος. Επομένως, εδώ το τελικό πλήθος τυχαίων σημείων είναι πάντα άγνωστο εξ αρχής. Δεν χρειάζεται να υπολογιστεί μέσω αυτού του λογισμικού, διότι δίνεται αυτόματα από το λογισμικό **OptEval**.



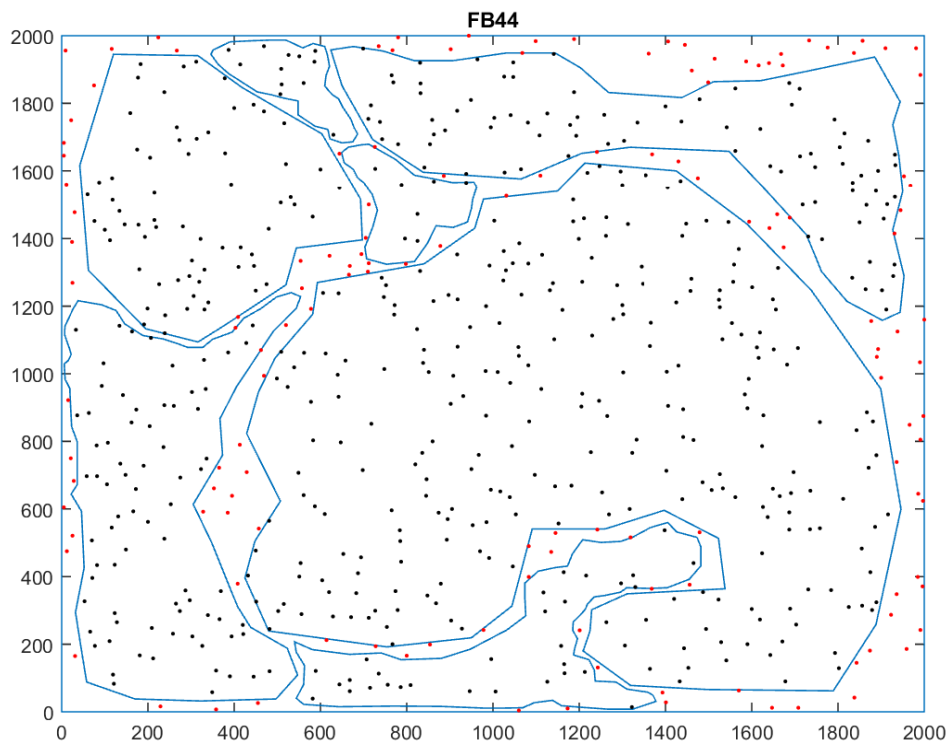
*Εικόνα 4.12: Οπτικοποίηση αποτελέσματος σεναρίου FOREST B14*



*Εικόνα 4.13: Οπτικοποίηση αποτελέσματος σεναρίου FOREST B23*



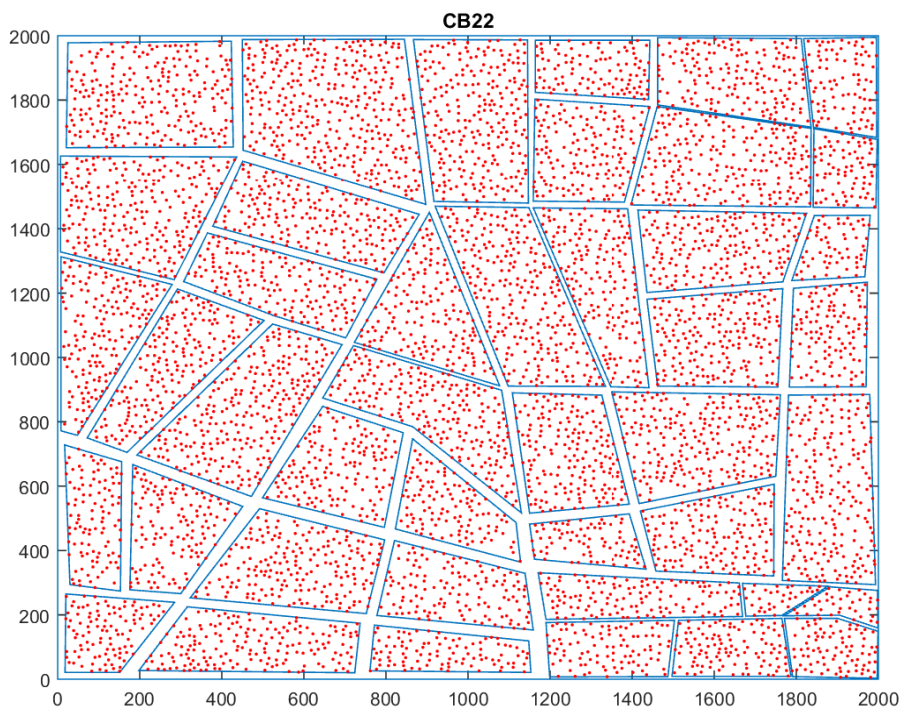
Εικόνα 4.14: Οπτικοποίηση αποτελέσματος σεναρίου FOREST B31



Εικόνα 4.15: Οπτικοποίηση αποτελέσματος σεναρίου FOREST B44

### Παραλλαγή 3<sup>η</sup>:

Στην περίπτωση του CITY B, ως πολύγωνα θεωρούνται τα οικοδομικά τετράγωνα. Επομένως, ο αρχικός πίνακας AREA που δημιουργείται από το συνοδευτικό λογισμικό έχει διαστάσεις 2000 x 2000 και τα κελιά που ανήκουν **εντός** των οικοδομικών τετραγώνων παίρνουν **τιμή 0** και όλα τα υπόλοιπα -1.



Εικόνα 4.16: Οπτικοποίηση αποτελέσματος σεναρίου CITY B22

Σημειώνεται ότι στο παράρτημα δίνονται αναλυτικά όλα τα αποτελέσματα των σεναρίων οπτικοποιημένα. Επιπλέον, παρόλο που στην παραλλαγή 2 στην οπτικοποίηση παρουσιάζονται και τα σημεία εντός των πολυγώνων, στο αρχείο txt καταγράφονται μόνο όσα είναι εκτός των νεκρών ζωνών.

#### 4.4 Κρισιμότητα της `my_inpolygon` συνάρτησης

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η συνάρτηση **inpolygon** έπαιξε καθοριστικό ρόλο στους ελέγχους και των δύο λογισμικών.

Κάθε κελί του πίνακα AREA έχει  $x,y$ . Τα  $x,y$  δίνονται σε κάθε επανάληψη από την συνάρτηση `randi` στο λογισμικό. Αυτόματα το κελί που χαρακτηρίζεται από το  $x,y$  του πίνακα παίρνει την τιμή 1 εάν η αρχική του τιμή ήταν 0. Σε αντίθετη περίπτωση (τιμή -1) προχωράει το λογισμικό στην επόμενη εύρεση τυχαίου ζεύγους  $x,y$ . Αφού πάρει την τιμή 1, το λογισμικό ελέγχει αν υπάρχει τυχαίο σημείο σε απόσταση μικρότερη από την επιτρεπόμενη. Για να γίνει αυτό καλείται η συνάρτηση **`my_inpolygon`**.

Η συνάρτηση αυτή έχει την ιδιότητα να εντοπίζει τις τιμές των κελίων γύρω από το εκάστοτε κελί με  $x,y$  του πίνακα ενδιαφέροντος, σε απόσταση δοσμένη  $m$ . Το κάθε

κελί με τιμή -1 το αντικαθιστά με 0 και επιστρέφει το άθροισμα των τιμών των κελιών ενδιαφέροντος. Στο σημείο αυτό διακρίνονται δύο περιπτώσεις. Εάν το άθροισμα είναι 1 τότε το ζεύγος x,y γίνεται δεκτό. Αν το άθροισμα είναι μεγαλύτερο του 1 τότε το ζεύγος x,y απορρίπτεται. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά και με παραδείγματα οι έλεγχοι του λογισμικού βάσει της **my\_inpolygon**.

Περίπτωση 1<sup>η</sup>:

Έστω ότι η ελάχιστη απόσταση είναι m=1 και εντός των περιμετρικών κελιών δεν υπάρχει άλλο δημιουργημένο τυχαίο σημείο. Ο αρχικός πίνακας θα έχει τη μορφή του πρώτου υποπίνακα και μετά τον έλεγχο ότι το κελί έχει την τιμή 0 και επιτρέπεται η τοποθέτηση τυχαίου σημείου, αποκτά την τιμή 1 και παίρνει τη μορφή του υποπίνακα 2. Με την εφαρμογή της συνάρτησης **my\_inpolygon** θα πάρει την μορφή του πίνακα 3. Με κόκκινο χρώμα επισημαίνεται η πιθανή θέση του τυχαίου σημείου.

0	-1	-1
0	<b>0</b>	0
-1	0	0

0	-1	-1
0	<b>1</b>	0
-1	0	0

0	0	0
0	<b>1</b>	0
0	0	0

Στη συνέχεια, η συνάρτηση **my\_inpolygon** υπολογίζει το άθροισμα των κελιών, το οποίο είναι **1**. Άρα η θέση αυτή δεν ανήκει εντός απαγορευμένης ζώνης και δεν υπάρχει άλλο τυχαίο σημείο σε απόσταση μικρότερη από m. Άρα το τυχαίο σημείο με x,y καταγράφεται στον πίνακα A και ο πίνακας AREA ενημερώνεται παίρνοντας την τιμή 1 πλέον (αντί για 0) στην θέση x,y.

Περίπτωση 2<sup>η</sup>:

Έστω ότι η ελάχιστη απόσταση είναι m=1 και εντός των περιμετρικών κελιών υπάρχει άλλο δημιουργημένο τυχαίο σημείο. Ο αρχικός πίνακας θα έχει τη μορφή του πρώτου υποπίνακα και μετά τον έλεγχο ότι το κελί έχει την τιμή 0 και επιτρέπεται η τοποθέτηση τυχαίου σημείου, αποκτά την τιμή 1 και παίρνει τη μορφή του υποπίνακα 2. Με την εφαρμογή της συνάρτησης **my\_inpolygon** θα πάρει την μορφή του πίνακα 3. Με κόκκινο χρώμα επισημαίνεται η πιθανή θέση του τυχαίου σημείου.

<b>1</b>	-1	-1
0	<b>0</b>	0
-1	0	0

<b>1</b>	-1	-1
0	<b>1</b>	0
-1	0	0

<b>1</b>	0	0
0	<b>1</b>	0
0	0	0

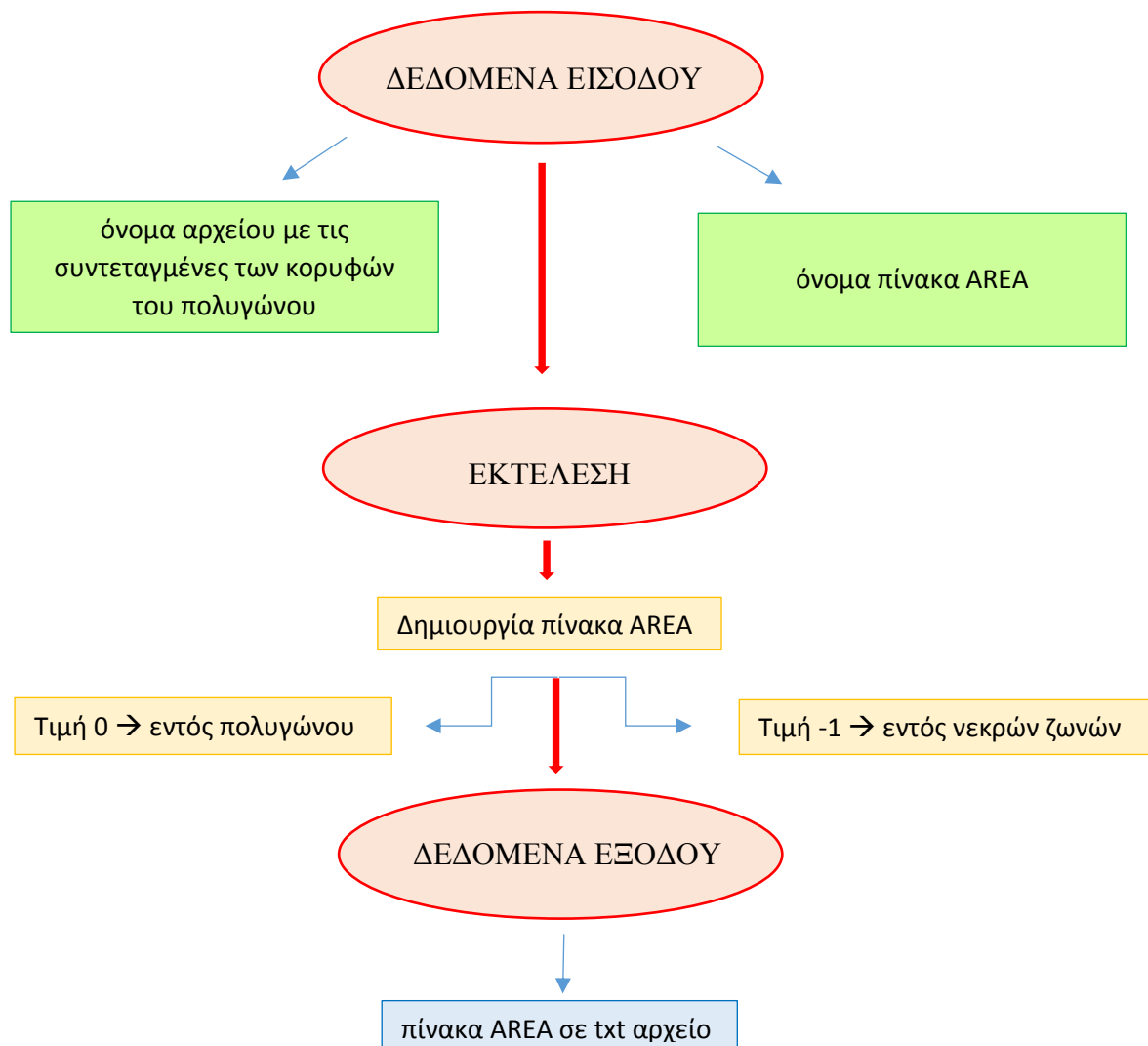


Στη συνέχεια, η συνάρτηση **my\_inpolygon** υπολογίζει το άθροισμα των κελίων, το οποίο είναι **2**. Άρα η θέση αυτή δεν ανήκει εντός απαγορευμένης ζώνης αλλά υπάρχει άλλο τυχαίο σημείο σε απόσταση μικρότερη από *m*. Άρα το τυχαίο σημείο με *x,y* απορρίπτεται και ο πίνακας AREA δεν ενημερώνεται κρατώντας την τιμή 0 στην θέση *x,y*.

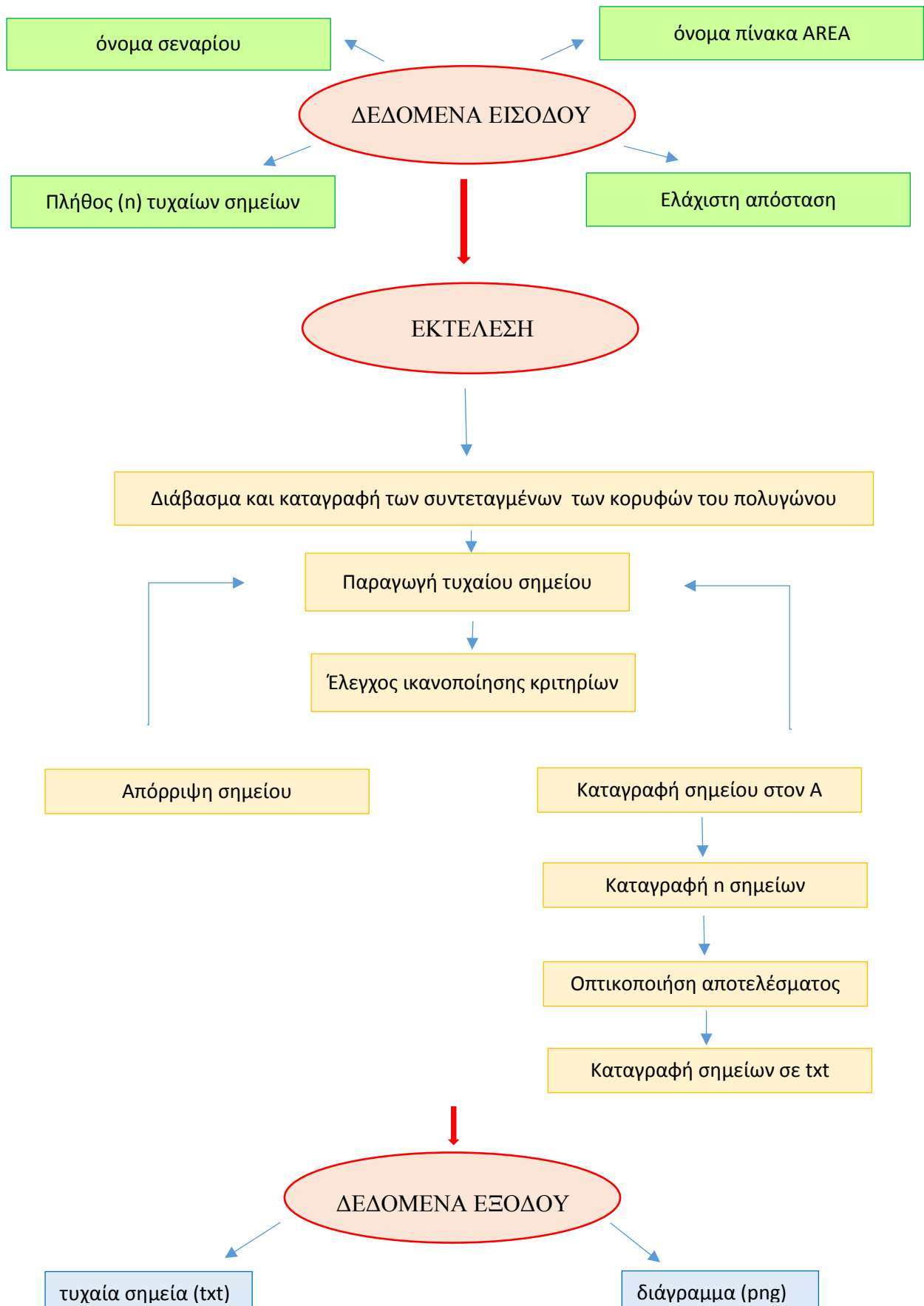
#### 4.5 Διάγραμμα ροής του λογισμικού παραγωγής τυχαίων σημείων

Για την καλύτερη παρουσίαση των λογισμικών παραγωγής τυχαίων σημείων (κύριου και συμπληρωματικού) δημιουργούνται τα αντίστοιχα διαγράμματα ροής.

##### 4.5.1 Λογισμικό δημιουργίας βοηθητικού πίνακα AREA



#### 4.5.2 Λογισμικό παραγωγής τυχαίων σημείων



#### 4.6 Εφαρμογή της Hausdorff distance στον αλγόριθμο του OptEval

Όπως αναφέρθηκε, επιλέχθηκε η μετρική **Hausdorff distance** με σκοπό να ελεγχθεί η σύγκλιση του λογισμικού **OptEval** (βλ. Κεφάλαιο 3.3).

Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκε στο χώρο του «Matlab» μια ρουτίνα με όνομα «**HausdorffDist.m**», η οποία υπολογίζει την απόσταση **Hausdorff** μεταξύ δύο συνόλων σημείων με χρήση έτοιμης συνάρτησης Matlab. Με τις κατάλληλες μετατροπές, το λογισμικό **OptEval** έχει πλέον τη δυνατότητα να καλεί μετά από κάθε επανάληψη εύρεσης νέων θεωρητικών θέσεων χωροθέτησης τη συνάρτηση αυτή. Με τον τρόπο αυτό, το λογισμικό λειτουργεί ακριβώς όπως σχεδιάστηκε αρχικά. και ταυτόχρονα κάνει τους επιθυμητούς υπολογισμούς κριτηρίων σύγκλισης.

Επεξηγηματικά, αναφέρεται ότι το λογισμικό **OptEval** δέχεται ως δεδομένα εισόδου ένα σετ τυχαίων σημείων που έχουν προκύψει από το λογισμικό παραγωγής τυχαίων σημείων. Ορίζονται από το χρήστη ως επιπλέον παράμετροι το πλήθος των θέσεων των αισθητήρων και η εμβέλειά τους, καθώς και ο αριθμός των επαναλήψεων που θα εκτελεστούν προκειμένου να προκύψουν οι βέλτιστες θέσεις χωροθέτησης αισθητήρων. Το λογισμικό **OptEval** εκκινώντας την εκτέλεση επιλέγει από τα τυχαία σημεία τόσα όσα και το πλήθος των αισθητήρων, θεωρώντας τα ως αρχικές θέσεις. Στη συνέχεια, υπολογίζει τις πρώτες θεωρητικές θέσεις τοποθέτησης αισθητήρων. Στο σημείο αυτό καλείται η **HausdorffDist.m** και υπολογίζει την απόσταση **Hausdorff** μεταξύ του συνόλου σημείων των αρχικών θέσεων και του συνόλου σημείων των θεωρητικών θέσεων τοποθέτησης αισθητήρων που προέκυψαν από το λογισμικό, καταγράφοντας τα σε αρχείο txt. Επιπλέον, μεταφέρεται μια ακόμα τροποποίηση στο λογισμικό ώστε μετά τον υπολογισμό της **Hausdorff** απόστασης, να υπολογίζονται οι πραγματικές θέσεις των αισθητήρων με την μέθοδο της εγγύτερης απόστασης (η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ήδη από το λογισμικό **OptEval** σε παρακάτω βήμα). Στη συνέχεια, καλείται ξανά η συνάρτηση **HausdorffDist.m** και υπολογίζεται η απόσταση **Hausdorff** μεταξύ των δύο συνόλων των θέσεων αισθητήρων που αφορούν τώρα πραγματικές θέσεις, καταγράφοντάς την επίσης σε αρχείο txt. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται για όσες επαναλήψεις έχουν οριστεί.

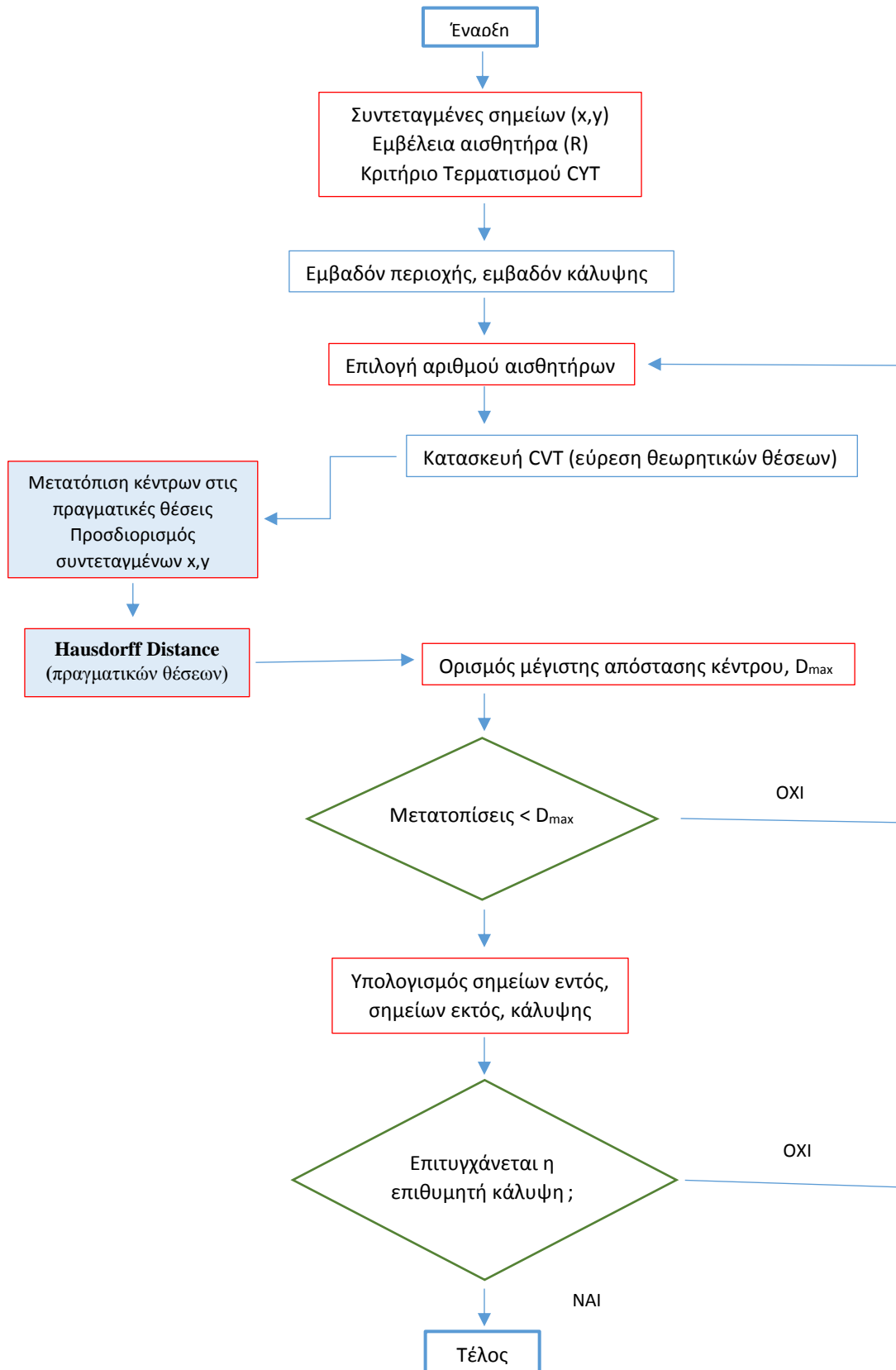
Επιπλέον, χρησιμοποιούνται παράμετροι του **OptEval** που περιγράφουν το πλήθος των σημείων που καλύπτεται από την εμβέλεια των τελικών θέσεων των αισθητήρων, το πλήθος των σημείων που δεν καλύπτεται από την εμβέλεια αυτή, το ποσοστό κάλυψης καθώς και ο χρόνος εκτέλεσης του λογισμικού.

Εκτός από την τροποποίηση του αλγορίθμου που αφορά στην παρακολούθηση των αποτελεσμάτων του **OptEval**, πραγματοποιήθηκε μια επιπλέον αναδιαμόρφωση του αλγορίθμου με σκοπό την χρήση μόνο των πραγματικών θέσεων, υπολογισμένων ανά επανάληψη, για την εύρεση της τελικής χωροθέτησης των αισθητήρων. Στα παρακάτω δοσμένα διαγράμματα ροής, φαίνονται αναλυτικά οι δύο τροποποιήσεις στον αλγόριθμο του **OptEval**.

#### 4.6.1 Διάγραμμα ροής τροποποίησης OptEval για την παρακολούθηση των αποτελεσμάτων



#### 4.6.2 Διάγραμμα ροής τροποποίησης OptEval για την χωροθέτηση βάσει των πραγματικών θέσεων

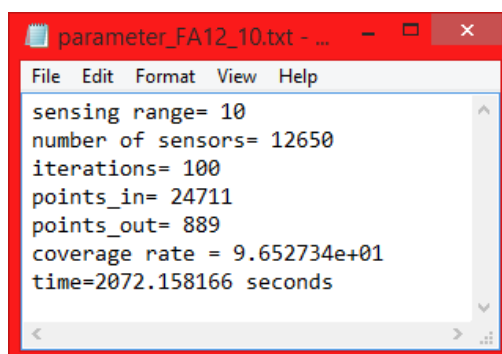


### 4.6.3 Επιπρόσθετα αρχεία εξόδου του OptEval

Σημαντικό κομμάτι της μελέτης αποτελούν όλες οι παράμετροι εισαγωγής στο **OptEval**, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις τροποποιήσεις του αλγορίθμου και κάποιες επιπλέον βοηθητικοί παράμετροι που υπολογίζονταν εξ αρχής από το λογισμικό. Συγκεκριμένα, η εμβέλεια των αισθητήρων, ο αριθμός των αισθητήρων, ο αριθμός των επαναλήψεων, το πλήθος των σημείων που καλύπτεται από την εμβέλεια των τελικών θέσεων των αισθητήρων, το πλήθος των σημείων που δεν καλύπτεται από την εμβέλεια αυτή, το ποσοστό κάλυψης καθώς και ο χρόνος εκτέλεσης του λογισμικού καταγράφονται σε αρχείο txt, για την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου.

Συγκεντρωτικά λοιπόν, εφαρμόζοντας την συνάρτηση **HausdorffDist.m** στο λογισμικό **OptEval** προκύπτουν 3 αρχεία εξόδου με βάση τα οποία θα γίνει η μελέτη των αποτελεσμάτων του λογισμικού. Τα αρχεία αυτά είναι:

- ✚ ένα αρχείο txt που περιέχει ανά γραμμή τον αριθμό επανάληψης και την απόσταση **Hausdorff** για τις θεωρητικές θέσεις τοποθέτησης των αισθητήρων,
- ✚ ένα αρχείο txt που περιέχει ανά γραμμή τον αριθμό επανάληψης και την απόσταση **Hausdorff** για τις πραγματικές θέσεις τοποθέτησης των αισθητήρων
- ✚ και το αρχείο καταγραφής των παραμέτρων ελέγχου.



```
parameter_FA12_10.txt - ...
File Edit Format View Help
sensing range= 10
number of sensors= 12650
iterations= 100
points_in= 24711
points_out= 889
coverage rate = 9.652734e+01
time=2072.158166 seconds
```

Εικόνα 4.17: Αρχείο καταγραφής παραμέτρων ελέγχου του λογισμικού **OptEval**

## 4.7 Αποτελέσματα εφαρμογής σεναρίων στο λογισμικού OptEval

Για την μελέτη των αποτελεσμάτων του λογισμικού αξιοποιήθηκαν όλα τα σεναρία τυχαίων σημείων που δημιουργήθηκαν για τον σκοπό αυτό και εκτελέστηκαν από το **OptEval** μετά την πρώτη τροποποίηση του. Επιπλέον, έγινε οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων με σκοπό να είναι πιο συγκεντρωτικά και κατανοητά.

Στον πίνακα 4.1 που ακολουθεί με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται τα σεναρία τυχαίων σημείων που το λογισμικό δεν μπόρεσε να εκτελέσει λόγω μεγέθους και με πράσινο χρώμα δίνονται τα σεναρία τυχαίων σημείων στα οποία επιτυγχάνεται 100% κάλυψη από τη χωροθέτηση των αισθητήρων. Επιπρόσθετα, δίνεται για την κάθε περίπτωση διάγραμμα που απεικονίζει την απόσταση **Hausdorff** των θεωρητικών θέσεων των αισθητήρων με κόκκινο χρώμα, καθώς και την απόσταση **Hausdorff** των πραγματικών θέσεων των αισθητήρων με μπλε χρώμα.

scenario	sensing range	number of sensors	iterations	points_in	points_out	coverage rate	time(sec)	hausdorff distance
FA01								
	10	12700	100					
FA02	20	3200	100	28785	3215	89.95%		<p><b>HD FA02 20</b></p>
	40	800	100	29075	2925	90.86%		<p><b>HD FA02 40</b></p>
	80	200	100	29257	2743	91.43%		<p><b>HD FA02 80</b></p>
	160	50	100	29161	2839	91.13%		<p><b>HD FA02 160</b></p>
FA03	20	3150	100	7424	576	92.80%		<p><b>HD FA03 20</b></p>

	40	800	100	7160	840	89.50%	<p><b>HD FA03 40</b></p>
	80	200	100	7142	858	89.28%	<p><b>HD FA03 80</b></p>
	160	50	100	7255	745	90.69%	<p><b>HD FA03 160</b></p>
	320	15	100	7691	309	96.14%	<p><b>HD FA03 320</b></p>
FA04	40	800	100	1850	150	92.50%	<p><b>HD FA04 40</b></p>



	80	200	100	1787	213	89.35%	<p><b>HD FA04 80</b></p>
	160	50	100	1791	209	89.55%	<p><b>HD FA04 160</b></p>
	320	15	100	1920	80	96.00%	<p><b>HD FA04 320</b></p>
FA05	80	200	100	458	42	91.60%	<p><b>HD FA05 80</b></p>
	160	50	100	450	50	90.00%	<p><b>HD FA05 160</b></p>

	320	15	100	466	34	93.20%		<p><b>HD FA05 320</b></p>
FA11								
FA12	10	12650	100	24711	889	96.52%	2072	<p><b>HD FA12 10</b></p>
	20	3200	100	24294	1306	94.89%	727	<p><b>HD FA12 20</b></p>
	40	800	100	24367	1233	95.18%	187	<p><b>HD FA12 40</b></p>
	80	200	100	24572	1028	95.98%	68	<p><b>HD FA12 80</b></p>

	160	50	100	23686	1914	92.52%	50	<p><b>HD FA12 160</b></p> <p>hausdorff distance vs iterations. Legend: HD=theoretical (red), HDr=real (blue).</p>
FA13	20	3200	100	6154	246	96.16%	27	<p><b>HD FA13 20</b></p> <p>hausdorff distance vs iterations. Legend: HD=theoretical (red), HDr=real (blue).</p>
	40	800	100	6054	346	94.59%	6	<p><b>HD FA13 40</b></p> <p>hausdorff distance vs iterations. Legend: HD=theoretical (red), HDr=real (blue).</p>
	80	200	100	6045	355	94.45%	3	<p><b>HD FA13 80</b></p> <p>hausdorff distance vs iterations. Legend: HD=theoretical (red), HDr=real (blue).</p>
	160	50	100	6002	398	93.78%	3	<p><b>HD FA13 160</b></p> <p>hausdorff distance vs iterations. Legend: HD=theoretical (red), HDr=real (blue).</p>

	320	15	100	6146	254	96.03%	2	<p><b>HD FA13 320</b></p> <p>hausdorff distance vs iterations</p>
FA14	40	800	100	1534	66	95.87%	1	<p><b>HD FA14 40</b></p> <p>hausdorff distance vs iterations</p>
	80	200	100	1488	112	93.00%	1	<p><b>HD FA14 80</b></p> <p>hausdorff distance vs iterations</p>
	160	50	100	1416	184	88.50%	1	<p><b>HD FA14 160</b></p> <p>hausdorff distance vs iterations</p>
	320	15	100	1521	79	95.06%	1	<p><b>HD FA14 320</b></p> <p>hausdorff distance vs iterations</p>

FA15	80	200	100	382	18	95.50%	5	<p>HD FA15 80</p>
	160	50	100	361	39	90.25%	6	<p>HD FA15 160</p>
	320	15	100	368	32	92.00%	1	<p>HD FA15 320</p>
FA21								
FA22	10	12670	100	19048	152	99.21%	2782	<p>HD FA22 10</p>
	20	3170	100	18833	367	98.09%	733	<p>HD FA22 20</p>

	40	800	100	18863	337	98.24%	150	<p><b>HD FA22 40</b></p>
	80	200	100	18689	511	97.34%	56	<p><b>HD FA22 80</b></p>
	160	50	100	18095	1105	94.24%	42	<p><b>HD FA22 160</b></p>
FA23	20	3150	100	4749	51	98.94%	375	<p><b>HD FA23 20</b></p>
	40	800	100	4643	157	96.72%	51	<p><b>HD FA23 40</b></p>

	80	200	100	4559	241	94.98%	17	<p><b>HD FA23 80</b></p>
	160	50	100	4510	290	93.96%	12	<p><b>HD FA23 160</b></p>
	320	15	100	4530	270	94.37%	11	<p><b>HD FA23 320</b></p>
FA24	40	800	100	1184	16	98.67%	30	<p><b>HD FA24 40</b></p>
	80	200	100	1143	57	95.25%	11	<p><b>HD FA24 80</b></p>

	160	50	100	1128	72	94.00%	5	
	320	15	100	1144	56	95.33%	5	
FA25	80	200	100	292	8	97.33%	7	
	160	50	100	273	27	91.00%	3	
	320	15	100	278	22	92.66%	3	
FA31								



FA32	10	12700	100	12800	0	100.00%	2268	<p>HD FA32 10</p>
	20	3170	50	12767	33	99.74%	197	<p>HD FA32 20</p>
	40	800	100	12772	28	99.78%	87	<p>HD FA32 40</p>
	80	200	100	12699	101	99.21%	39	<p>HD FA32 80</p>
	160	50	100	12430	370	97.11%	29	<p>HD FA32 160</p>

FA33	20	3150	100	3200	0	100.00%	176	<p>HD FA33 20</p>
	40	800	100	3183	17	99.47%	43	<p>HD FA33 40</p>
	80	200	100	3130	70	97.81%	15	<p>HD FA33 80</p>
	160	50	100	3080	120	96.25%	12	<p>HD FA33 160</p>
	320	15	100	2909	291	90.91%	9	<p>HD FA33 320</p>

FA34	40	800	100	800	0	100.00%	32	<p><b>HD FA34 40</b></p> <p>hausdorff distance vs iterations. HD=theoretical (red), HDr=real (blue). Both are at 0.</p>
	80	200	100	792	8	99.00%	7	<p><b>HD FA34 80</b></p> <p>hausdorff distance vs iterations. HD=theoretical (red), HDr=real (blue). Both drop to 0 quickly.</p>
	160	50	100	766	34	95.75%	4	<p><b>HD FA34 160</b></p> <p>hausdorff distance vs iterations. HD=theoretical (red), HDr=real (blue). Both drop to 0 quickly.</p>
	320	15	100	734	66	91.75%	3	<p><b>HD FA34 320</b></p> <p>hausdorff distance vs iterations. HD=theoretical (red), HDr=real (blue). Both drop to 0 quickly.</p>
FA35	80	200	100	200	0	100.00%	6	<p><b>HD FA35 80</b></p> <p>hausdorff distance vs iterations. HD=theoretical (red), HDr=real (blue). Both are at 0.</p>

	160	50	100	186	14	93.00%	3	
	320	15	100	178	22	89.00%	3	
FA41								
	10	12700	50					
	20	3170	50	6398	2	99.97%	108	
FA42	40	800	50	6391	9	99.86%	29	
	80	200	50	6373	27	99.58%	12	

	160	50	50	6300	100	98.43%	10	
	20	3150	100					
FA43	40	800	100	1599	1	99.94%	32	
	80	200	100	1584	16	99.00%	9	
	160	50	100	1543	57	96.43%	6	
	320	15	100	1529	71	95.56%	5	
	FA44	40	800	100				

	80	200	100	399	1	99.75%	9	<p>HD FA44 80</p>
	160	50	100	386	14	96.50%	5	<p>HD FA44 160</p>
	320	15	100	371	29	92.75%	3	<p>HD FA44 320</p>
FA45	40	800	100					
	80	200	100					
	160	50	100	94	6	94.00%	10	<p>HD FA45 160</p>
	320	15	100	96	4	96.00%	2	<p>HD FA45 320</p>
FB01								
FB02	10	12700	100					

	20	3170	20	47272	6061	88.63%	299	<p><b>HD FB02 20</b></p> <p>hausdorff distance vs iterations</p> <p>Legend: HD=theoretical (red), HDr=real (blue)</p>
	40	800	50	48469	4864	90.88%	207	<p><b>HD FB02 40</b></p> <p>hausdorff distance vs iterations</p> <p>Legend: HD=theoretical (red), HDr=real (blue)</p>
	80	200	50	48785	4548	91.47%	102	<p><b>HD FB02 80</b></p> <p>hausdorff distance vs iterations</p> <p>Legend: HD=theoretical (red), HDr=real (blue)</p>
	160	50	50	48590	4743	91.10%	73	<p><b>HD FB02 160</b></p> <p>hausdorff distance vs iterations</p> <p>Legend: HD=theoretical (red), HDr=real (blue)</p>
FB03	20	3150	100	11836	1497	88.77%	383	<p><b>HD FB03 20</b></p> <p>hausdorff distance vs iterations</p> <p>Legend: HD=theoretical (red), HDr=real (blue)</p>

	40	800	100	11805	1528	88.53%	113	<p><b>HD FB03 40</b></p>
	80	200	100	12088	1245	90.66%	39	<p><b>HD FB03 80</b></p>
	160	50	100	12037	1296	90.28%	32	<p><b>HD FB03 160</b></p>
	320	15	100	12830	503	96.22%	28	<p><b>HD FB03 320</b></p>
FB04	40	800	100	2950	383	88.51%	40	<p><b>HD FB04 40</b></p>



	80	200	100	2978	355	89.34%	14	<p><b>HD FB04 80</b></p> <p>hausdorff distance vs iterations. Legend: HD=theoretical (red), HDr=real (blue).</p>
	160	50	100	3001	332	90.04%	9	<p><b>HD FB04 160</b></p> <p>hausdorff distance vs iterations. Legend: HD=theoretical (red), HDr=real (blue).</p>
	320	15	100	3134	199	94.03%	8	<p><b>HD FB04 320</b></p> <p>hausdorff distance vs iterations. Legend: HD=theoretical (red), HDr=real (blue).</p>
FB05	80	200	100	735	98	88.23%	7	<p><b>HD FB05 80</b></p> <p>hausdorff distance vs iterations. Legend: HD=theoretical (red), HDr=real (blue).</p>
	160	50	100	731	102	87.75%	4	<p><b>HD FB05 160</b></p> <p>hausdorff distance vs iterations. Legend: HD=theoretical (red), HDr=real (blue).</p>

	320	15	100	786	47	94.36%	4	
FB11								
FB12	10	12700	100					
	20	3170	100					
	40	800	100					
FB12	80	200	100	32078	1497	93.74%	108	
FB12	160	50	100	31509	2066	92.08%	73	
FB13	20	3170	100					
	40	800	100	8030	496	93.86%	60	
	80	200	100	8069	457	94.32%	24	

	160	50	100	8072	454	94.35%	21	
	320	15	100	8150	376	95.26%	19	
	40	800	100					
FB14	80	200	100	1994	141	93.26%	12	
	160	50	100	1982	153	92.70%	8	
	320	15	100	2046	89	95.69%	6	

FB15	80	200	100	493	35	93.37%	7	
	160	50	100	464	64	87.87%	10	
	320	50	100	528	0	100.00%	4	
FB21								
FB22	10	12700	100					
	20	3170	50	18838	387	97.98%	337	
	40	800	100	18864	361	98.23%	189	

	80	200	100	18703	522	97.28%	78	<p>HD FB22 80</p>
	160	50	100	18178	1047	94.55%	71	<p>HD FB22 160</p>
	20	3170	100					
FB23	40	800	100	4658	171	96.45%	45	<p>HD FB23 40</p>
	80	200	100	4674	155	96.79%	17	<p>HD FB23 80</p>
	160	50	100	4521	308	93.62%	12	<p>HD FB23 160</p>

	320	15	100	4572	257	94.67%	12	<p><b>HD FB23 320</b></p>
FB24	40	800	100	1177	18	98.49%	35	<p><b>HD FB24 40</b></p>
	80	200	100	1131	64	94.64%	9	<p><b>HD FB24 80</b></p>
	160	50	100	1067	128	89.28%	6	<p><b>HD FB24 160</b></p>
	320	15	100	1119	76	93.64%	5	<p><b>HD FB24 320</b></p>

FB25	80	200	100	295	5	98.33%	6	<p>HD FB25 80</p>
	160	50	100	278	22	92.66%	4	<p>HD FB25 160</p>
	320	15	100	281	19	93.66%	3	<p>HD FB25 320</p>
FB31								
FB32	10	12700	100					
	20	3160	50	8906	20	99.77%	140	<p>HD FB32 20</p>
	40	800	100	8907	19	99.78%	99	<p>HD FB32 40</p>

	80	200	100	8898	28	99.68%	38	<p>HD FB32 80</p>
	160	50	100	8411	515	94.23%	22	<p>HD FB32 160</p>
	20	3170	100					
FB33	40	800	100	2184	17	99.22%	36	<p>HD FB33 40</p>
	80	200	100	2146	55	97.50%	12	<p>HD FB33 80</p>
	160	50	100	2044	157	92.86%	7	<p>HD FB33 160</p>



	320	15	100	2079	122	94.45%	7	<p><b>HD FB33 320</b></p>
FB34	40	800	100					
	80	200	100	569	4	99.30%	6	<p><b>HD FB34 80</b></p>
	160	50	100	542	31	94.58%	4	<p><b>HD FB34 160</b></p>
	320	15	100	519	54	90.57%	4	<p><b>HD FB34 320</b></p>
FB35	80	200	100					
	160	50	100	119	4	96.74%	3	<p><b>HD FB35 160</b></p>

	320	15	100	108	15	87.80%	2	
FB41								
	10	12700	100					
	20	3160	100					
	40	800	100	2142	0	100.00%	56	
FB42	80	200	100	2112	30	98.59%	12	
	160	50	100	2076	66	96.92%	8	
	20	3160	100					
	40	800	100					
FB43	80	200	100	515	7	98.65%	13	

	160	50	100	506	16	96.93%	6	<p>HD FB43 160</p>
	320	15	100	495	27	94.82%	6	<p>HD FB43 320</p>
FB44	40	800	100					
	80	200	100					
	160	50	100	133	5	96.37%	7	<p>HD FB44 160</p>
	320	15	100	128	10	92.75%	3	<p>HD FB44 320</p>
FB45	80	200	100					
	160	50	100					
	320	15	100	39	2	95.12%	3	<p>HD FB45 320</p>
CA11	10							

	20	3170	100	9549	51	99.46%	445	
	40	800	100	9447	153	98.40%	101	
	80	200	100	9034	566	94.10%	42	
	160	50	100	8614	986	89.72%	24	
CA12	10							
	20	3170	100					
	40	800	100	2362	38	98.41%	38	

	80	200	100	2226	174	92.75%	13	
	160	50	100	2058	342	85.75%	9	
CA13	20	3170	100					
	40	800	100					
	80	200	100	568	32	94.66%	17	
	160	50	100	528	72	88.00%	4	
CA14	40	800	100					
	80	200	100					
	160	50	100	143	7	95.33%	3	
CA15	80	200	100					

	160	50	100					
	10							
CA21	20	3170	100	4798	2	99.95%	232	<p><b>HD CA21 20</b></p>
	40	800	100	4739	61	98.72%	69	<p><b>HD CA21 40</b></p>
	80	200	100	4594	206	95.70%	18	<p><b>HD CA21 80</b></p>
	160	50	100	4279	521	89.14%	13	<p><b>HD CA21 160</b></p>
CA22	10							
	20	3170	100					
	40	800	100	1197	3	99.75%	32	<p><b>HD CA22 40</b></p>

	80	200	100	1128	72	94.00%	9	
	160	50	100	1059	141	88.25%	6	
CA23	20	3170	100					
	40	800	100					
	80	200	100	295	5	98.33%	10	
	160	50	100	245	55	81.66%	3	
CA24	40	800	100					
	80	200	100					
	160	40	100	72	3	96.00%	3	
CA25								

CB11	10	11950	20	21885	515	97.70%	425	
	20	2990	50	21345	1055	95.29%	201	
	40	800	50	21329	1071	95.22%	58	
	80	200	100	21359	1041	95.35%	63	
	160	50	100	20437	1963	91.23%	49	
CB12	10							



	20	2300	100	5134	466	91.68%	175	<p>HD CB12 20</p>
	40	800	100	5324	276	95.07%	69	<p>HD CB12 40</p>
	80	200	100	5206	394	92.96%	20	<p>HD CB12 80</p>
	160	50	100	5123	477	91.48%	15	<p>HD CB12 160</p>
	20							
CB13	40	800	100	1366	34	97.57%	33	<p>HD CB13 40</p>

	80	200	100	1323	77	94.50%	10	<p><b>HD CB13 80</b></p>
	160	50	100	1302	98	93.00%	6	<p><b>HD CB13 160</b></p>
	40							
CB14	80	200	100	342	9	97.42%	6	<p><b>HD CB14 80</b></p>
	160	50	100	315	35	90	3	<p><b>HD CB14 160</b></p>
	80							
CB15	160	40	100	80	7	91.95%	3	<p><b>HD CB15 160</b></p>

CB21	10	12200	100	25749	1451	94.66%	3412	
	20	3050	50	25059	2141	92.12%	359	
	40	800	100	25412	1788	93.42%	209	
	80	200	200	25154	2046	92.47%	194	
	160	50	200	25164	2036	92.51%	124	
CB22	10							

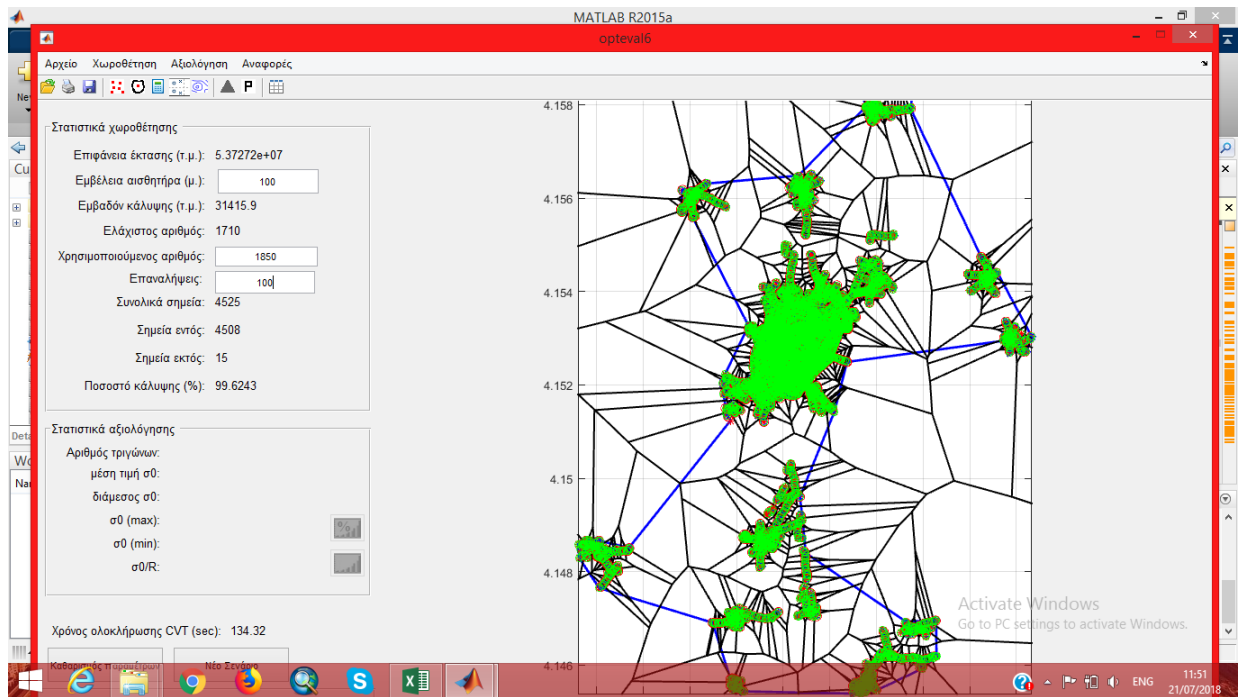
	20	3030	100	6356	444	93.47%	276	
	40	800	100	6260	540	92.05%	74	
	80	200	100	6291	509	92.51%	23	
	160	200	100	6800	0	100.00%	21	
	20							
CB23	40	800	100	1593	107	93.71%	42	

	80	200	100	1556	144	91.52%	8	
	160	50	100	1536	164	90.35%	5	
	40							
CB24	80	200	100	400	25	94.11%	6	
	160	200	100	425	0	100.00%	11	
	80							
CB25	160	40	100	92	14	86.79%	3	

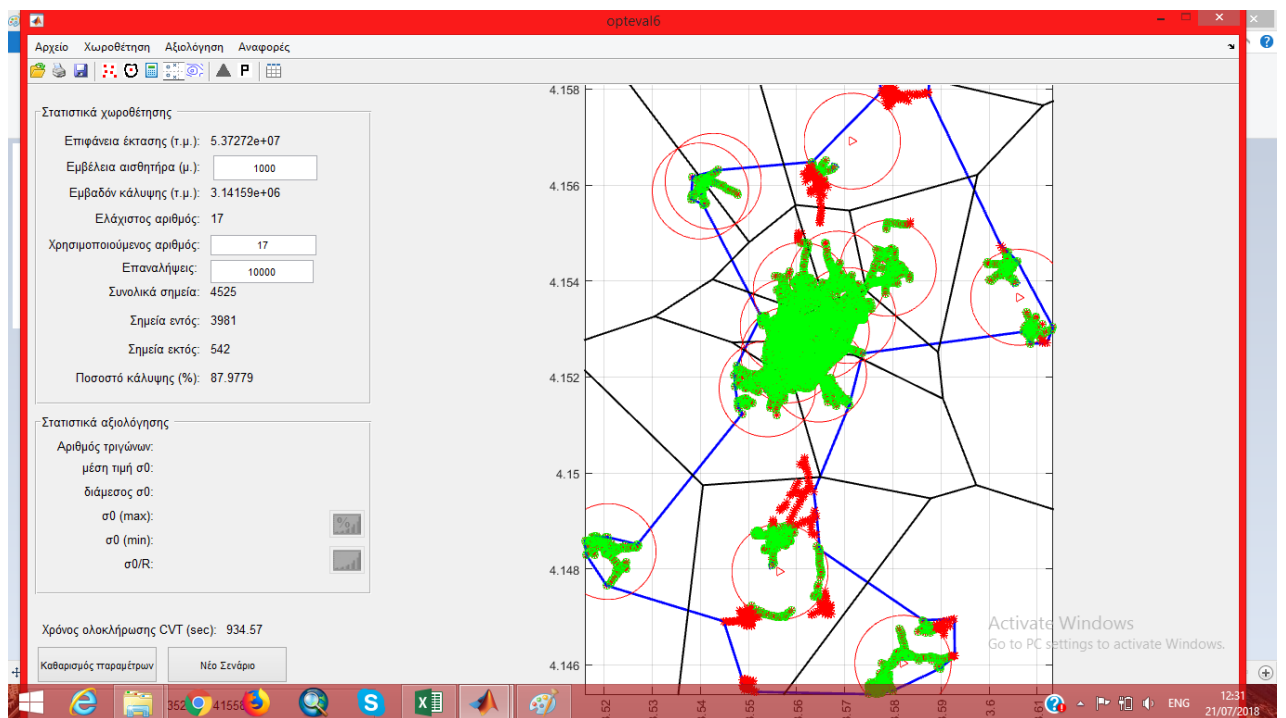
CC11	100	1850	100	4508	15	99.62%	148	
	200	500	1000	4497	26	99.38%	257	
	1000	17	10000	3981	542	87.97%	943	
CC21	500	1200	100	12766	7	99.92%	114	
	1000	300	1000	12711	62	99.49%	445	

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα του λογισμικού **OptEval**

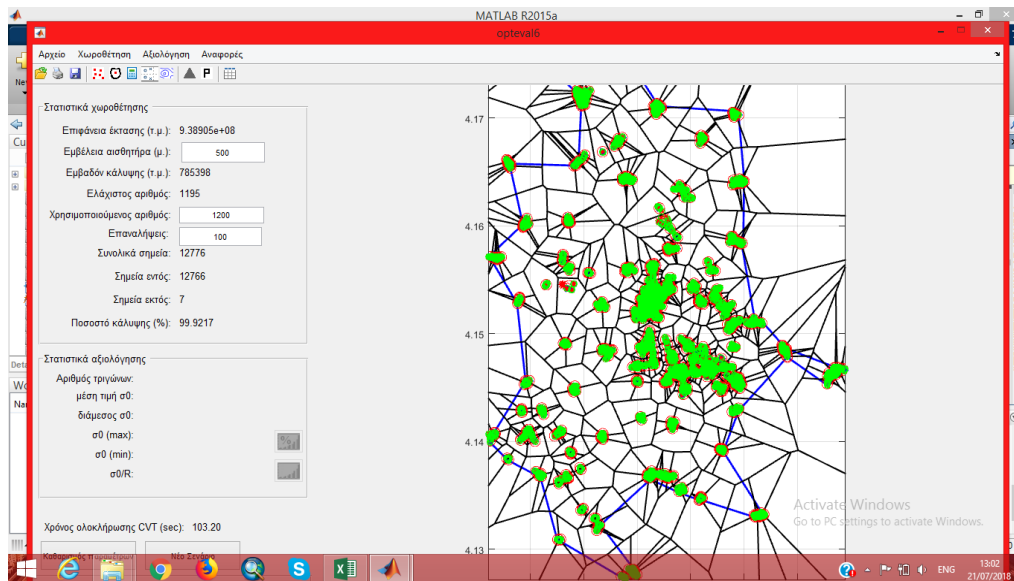
Τέλος, δίνονται οπτικοποιημένα τα αποτελέσματα του λογισμικού για τα πραγματικά σενάρια της Τρίπολης.



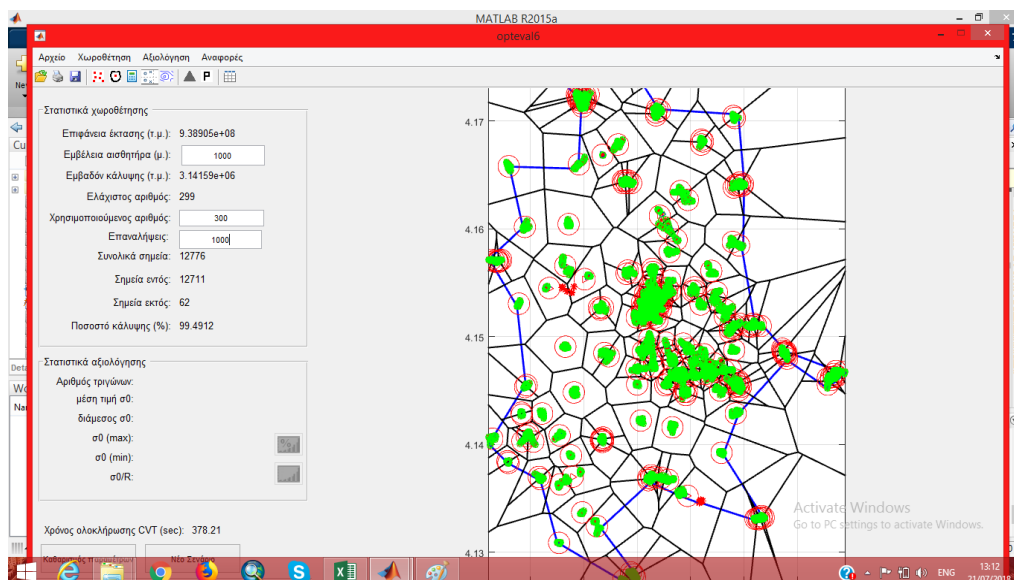
Εικόνα 4.18: Αποτελέσματα OptEval του Δήμου Τρίπολης για 1850 αισθητήρες εμβέλειας 100m



Εικόνα 4.19: Αποτελέσματα OptEval του Δήμου Τρίπολης για 17 αισθητήρες εμβέλειας 1000m



Εικόνα 4.20: Αποτελέσματα OptEval του συνόλου Καλλικρατικού Δήμου Τρίπολης για 1200 αισθητήρες εμβέλειας 500m



Εικόνα 4.21: Αποτελέσματα OptEval του συνόλου Καλλικρατικού Δήμου Τρίπολης για 300 αισθητήρες εμβέλειας 1000m

Από τα παραπάνω αποτελέσματα επιλέχθηκαν κάποια σενάρια στα οποία η απόσταση **Hausdorff** των πραγματικών θέσεων των αισθητήρων παρουσίαζε πολλές αυξομειώσεις πριν την σύγκλισή της. Τα σενάρια αυτά εκτελέστηκαν ξανά από το τροποποιημένο OptEval που χρησιμοποιεί για την χωροθέτηση αποκλείστηκα τις πραγματικές θέσεις των αισθητήρων σε κάθε επανάληψη.

Στον πίνακα 4.2 που ακολουθεί με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται τα σετ τυχαίων σημείων που το λογισμικό δεν μπορούσε να εκτελέσει. Επιπρόσθετα, δίνεται για την κάθε περίπτωση διάγραμμα που απεικονίζει την απόσταση **Hausdorff** των πραγματικών θέσεων των αισθητήρων με μπλε χρώμα.



scenario	sensing range	number of sensors	iterations	points_in	points_out	coverage rate	time(sec)	hausdorff distance
FA12	40	800	100	23479	2121	91.71%	153	<p><b>HD FA12 40</b></p>
	80	200	100	24166	1434	94.40%	67	<p><b>HD FA12 80</b></p>
FA33	160	50	100	2848	352	89.00%	11	<p><b>HD FA33 160</b></p>
FA43	320	15	100	1521	79	95.06%	6	<p><b>HD FA43 320</b></p>
FB03	160	50	100	11740	1593	88.05%	28	<p><b>HD FB03 160</b></p>

FB13	160	50	100	7561	965	88.38%	18	
FB34	80	200	100	Error using delaunayTriangulation				
FB42	40	800	100	Error using delaunayTriangulation				
CA12	160	50	100	2046	354	85.25%	8	
CB21	40	800	100	24015	3185	88.29%	132	
CC11	100	1850	100	Error using delaunayTriangulation				
	1000	17	100	4069	454	89.92%	13	
CC21	500	1200	100	Error using delaunayTriangulation				
	1000	300	100	12354	419	96.69%	47	

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα του τροποποιημένου λογισμικού *OptEval*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

#### 5.1 Συμπεράσματα

Το αντικείμενο μελέτης της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αφορά:

- στην εκτεταμένη μελέτη συμπεριφοράς του αλγορίθμου υπολογιστικής γεωμετρίας για τη χωροθέτηση σημείων στο επίπεδο, ο οποίος προτάθηκε στη διατριβή του Α. Ηλιοδρομίτη
- στην αναζήτηση κριτηρίου σύγκλισης του λογισμικού **OptEval** χρησιμοποιώντας την μετρική **Hausdorff**
- στη δημιουργία σεναρίων τυχαίων σημείων και στην κατασκευή λογισμικού παραγωγής τους, τα οποία αποτελούν εργαλείο αξιολόγησης των αποτελεσμάτων του λογισμικού **OptEval**, σε ακραίες περιπτώσεις

Συγκεκριμένα, με βάση τα αποτελέσματα που δίνονται στους πίνακες 6 και 7 μελετήθηκε η συμπεριφορά του αλγορίθμου και παρατηρήθηκε ότι:

- η έλλειψη κριτηρίου σύγκλισης υποβάλει τον αλγόριθμο σε εξαντλητικές επαναλήψεις εκτέλεσης, ώστε να μειωθούν οι πιθανότητες εύρεσης κακού αποτελέσματος για τη χωροθέτηση των αισθητήρων.
- Η εμβέλεια που ορίζεται στο λογισμικό **OptEval** πρέπει πάντα να είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη απόσταση των σημείων. Αυτό ήταν ιδιαίτερα εμφανές στα σενάρια της Τρίπολης, όπου επιχειρήθηκε η χωροθέτηση αισθητήρων για όλους τους Δήμους. Εκεί, τα σημεία εντός των δήμων είχαν μικρή μεταξύ τους απόσταση, αλλά τα σημεία από διαφορετικούς δήμους μεγάλη. Επομένως, το **OptEval** εξέτασε την χωροθέτηση με βάση την απόσταση των δημοτικών ενοτήτων.
- Επιπλέον, εάν το πλήθος των σημείων εισόδου είναι μικρότερο, από το προτεινόμενο αριθμό αισθητήρων του λογισμικού, το λογισμικό τερματίζεται. Δηλαδή, για παράδειγμα σε μια περιοχή εξέτασης το συνολικό της εμβαδό διαιρούμενο με την εμβέλεια των αισθητήρων δίνει τον προτεινόμενο αριθμό αισθητήρων. Εάν ο αριθμός αυτός είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των σημείων εισόδου και ο χρήστης τον χρησιμοποιήσει ως δεδομένο εισόδου, αυτόματα τερματίζεται το λογισμικό. Στη περίπτωση αυτή, ο χρήστης πρέπει να ορίσει αυθαίρετα το πλήθος των αισθητήρων, πράγμα ανούσιο καθώς το ποσοστό κάλυψης θα είναι εν τέλει πολύ μικρό.
- Επίσης, συμπεραίνεται ότι ο προγραμματιστικός χώρος του matlab παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα για μικρό πλήθος τυχαίων σημείων (<800.000), αλλά παρουσιάζει υπολογιστικές δυσκολίες όσο αυξάνεται το πλήθος των σημείων εισόδου και όσο μειώνεται ταυτόχρονα η εμβέλεια των αισθητήρων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σε κάποια σενάρια που αφορούσαν, να μην μπορούν να εκτελεστούν.
- Ύστερα, συμπεραίνεται ότι για μικρό πλήθος τυχαίων σημείων εισόδου το λογισμικό **OptEval** εκτελεί τις διαδικασίες του σε αρκετά ικανοποιητικό χρονικό διάστημα. Για τα σενάρια που εκτελέστηκαν ο ελάχιστος χρόνος εκτέλεσης ήταν 1 δευτερόλεπτο, ενώ ο μέγιστος 3412 δευτερόλεπτα, δηλαδή περίπου 1 ώρα.

- Επιπλέον, προκύπτει ότι το λογισμικό βγάζει ικανοποιητικό ποσοστό κάλυψης για όλες τα σενάρια και μάλιστα σε κάποιες περιπτώσεις επιτυγχάνεται 100% κάλυψη.

Η κατασκευή λογισμικού παραγωγής τυχαίων σημείων έχει καθοριστικό ρόλο στην παρούσα μελέτη. Χρησιμοποιείται ως εργαλείο δημιουργίας ακραίων – οριακών περιπτώσεων κατανομών τυχαίων σημείων. Το σημαντικότερο όμως είναι τα χαρακτηριστικά των κατανομών των τυχαίων σημείων. Η φιλοσοφία υλοποίησής τους διέπεται από:

- τον λεπτομερή σχεδιασμό ώστε τα σενάρια να προσεγγίζουν όσο το δυνατό καλύτερα πραγματικές συνθήκες,
- τον ικανοποιητικό όγκο σημείων,
- το να ποικίλει ο βαθμός δυσκολίας στον οποίο θα εξαναγκάσουν το λογισμικό **OptEval** να λειτουργήσει.

Όσον αφορά στην εκτέλεση του λογισμικού παραγωγής τυχαίων σημείων συμπεραίνεται ότι:

- οι εκτελέσεις του λογισμικού παραγωγής τυχαίων σημείων ήταν εξαντλητικές και πολύωρες και
- χρειάστηκαν πολλές δοκιμές και τροποποιήσεις για τον σχεδιασμό του βέλτιστου λογισμικού δημιουργίας των σεναρίων αξιολόγησης των αποτελεσμάτων του **OptEval**.

Επιπρόσθετα, οι διαδικασίες που πραγματοποιούνται στη παρούσα εργασία επιδιώκουν τη εύρεση κριτηρίου σύγκλισης του αλγορίθμου που υλοποιείται μέσω του λογισμικού **OptEval**. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, το λογισμικό **OptEval** χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο του **Lloyd** για κατασκευή των CVT, ο οποίος είναι σχεδιασμένος να συγκλίνει.

Από τη χρήση της απόστασης **Hausdorff** ως κριτήριο σύγκλισης στο λογισμικό **OptEval** :

- προκύπτει ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει και μάλιστα με πολύ λιγότερες επαναλήψεις από αυτές που έχουν οριστεί.
- Επίσης, παρατηρείται ότι το διάγραμμα της απόστασης **Hausdorff** που εφαρμόζεται στα σύνολα των θεωρητικών θέσεων τοποθέτησης αισθητήρων, μόλις μηδενιστεί παύει να έχει αυξομειώσεις,
- ενώ το διάγραμμα της απόστασης **Hausdorff** που εφαρμόζεται στα σύνολα των πραγματικών θέσεων τοποθέτησης αισθητήρων, έχει κάποιες αυξομειώσεις μεταξύ του πρώτου μηδενισμού της απόστασης **Hausdorff** μέχρι τον οριστικό μηδενισμό της.
- Επιπλέον, μετά την επανάληψη στην οποία μηδενίζεται η απόστασης **Hausdorff** για τις θεωρητικές θέσεις, έχει μηδενιστεί χωρίς να αλλάζει πλέον και η απόσταση **Hausdorff** των πραγματικών θέσεων.
- Επίσης, από τη τροποποίηση του λογισμικού **OptEval** ώστε να πραγματοποιεί τη χωροθέτηση βασιζόμενο μόνο στις πραγματικές θέσεις των αισθητήρων συμπεραίνεται ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει ταχύτερα, αλλά υπάρχουν περιπτώσεις που αποκλίνει.

- Ωστόσο, δεν αποδεικνύεται μαθηματικά ότι η λύση που βρίσκεται με το συγκεκριμένο κριτήριο σύγκλισης είναι βέλτιστη

Συμπερασματικά:

- ✚ Ο αλγόριθμος του λογισμικού **OptEval** είναι πιθανό να μην συγκλίνει πάντα όταν πραγματοποιείται χωροθέτηση με βάση τις υπαρκτές θέσεις τοποθέτησης αισθητήρων.
- ✚ η μετρική **Hausdorff distance** μπορεί να αποτελέσει κριτήριο τερματισμού του λογισμικού **OptEval**

## 5.2 Προτάσεις – επόμενα βήματα

Με βάση τα παραπάνω μπορούν να προταθούν τα επόμενα βήματα με σκοπό την συνέχιση της ερευνητικής εργασίας.

- ✚ Για τη διερεύνηση μεγάλων σε όγκο προβλημάτων, με δεδομένους τους περιορισμούς της Matlab, προτείνεται η υλοποίηση του αλγόριθμου σε άλλη γλώσσα προγραμματισμού. Η Python και η R προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα, τόσο ως προς την σύνταξη του λογισμικού όσο και στις παρεχόμενες βιβλιοθήκες, οι οποίες μπορούν να εξασφαλίσουν καλύτερη συμπεριφορά σε επίπεδο απαιτήσεων πόρων.
- ✚ Μια επιμέρους βελτίωση αποτελεί η εισαγωγή των δεδομένων και των παραμέτρων στο λογισμικό από διάφορες πρότυπες μορφές αρχείων και δομών (xml, json), για την ταχύτερη εκτέλεση της όλης διαδικασίας.
- ✚ Είναι απαραίτητη μια θεωρητική μαθηματική απόδειξη της σύγκλισης του πλήρους αλγορίθμου, η μελέτη της πολυπλοκότητάς του, καθώς και η διερεύνηση της εύρεσης βέλτιστης λύσης.



## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

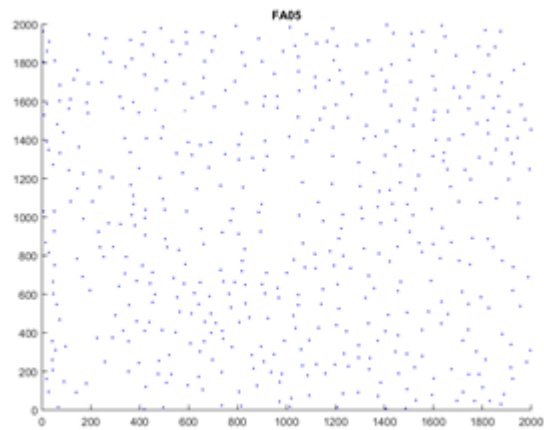
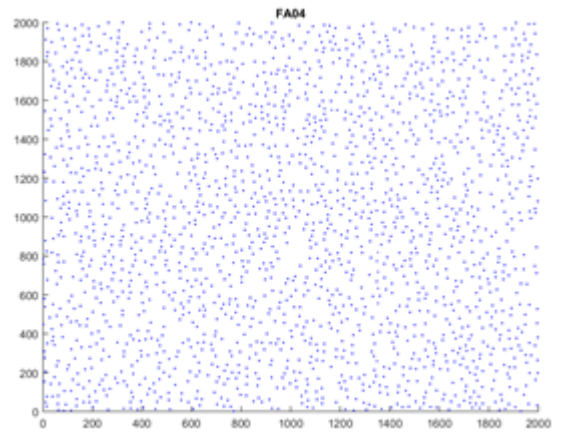
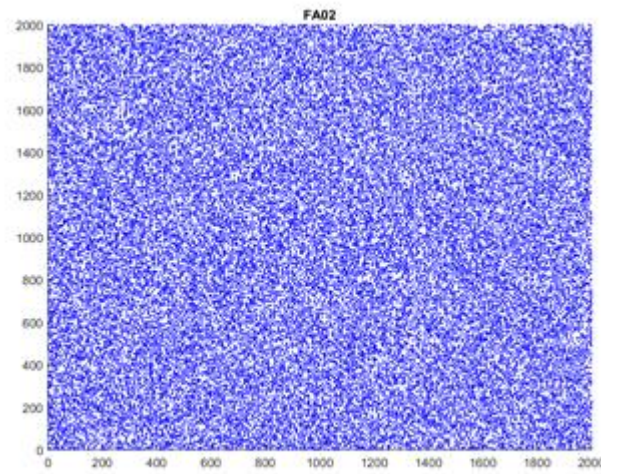
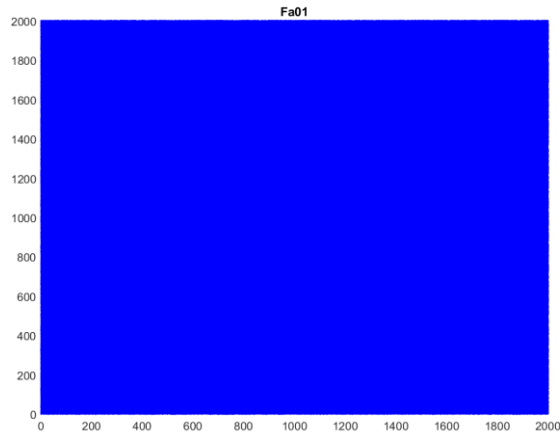
1. Argany, M., Mostafavi, M., & Karimipour, F. (2011). A GIS Based Wireless Sensor Network Coverage Estimation and Optimization: A Voronoi Approach. Στο *Transactions on Computational Science XIV* (σσ. 151172). Springer Berlin Heidelberg.
2. Dagar, A., & Saroha, V. (2013, 4). An Efficient Coverage Scheme for Wireless Sensor Network. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*.
3. Devaraj, A. (2015). Mesh Simplification in Wireless Sensor Networks Using INRCDS. *4th International Conference on Circuits, Systems* (σσ. 179184). Kuala Lumpur: WSEAS Press
4. 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.
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. Song, G., Zhou, Y., Ding, F., & Song, A. (2008, 8). A mobile sensor network system for monitoring of unfriendly environments. *Sensors*, σσ. 72597274.
7. Toumpis, S., & Tassiulas, L. (2006, July 05). Optimal deployment of large wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, σσ. 2935 - 2953.
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. 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.
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. 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.

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. 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.
14. 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.
15. Ηλιοδρομίτης Α. (2017). "Ανάπτυξη μεθοδολογιών χωροθετησης & αξιολόγησης ασύρματων δικτύων γεωαισθητήρων με αλγορίθμους υπολογιστικής γεωμετρίας" (Διδακτορική Διατριβή). Αθήνα: ΣΑΤΜ, ΕΜΠ.
16. Κολεγά, Ε. (2014). "Πολυκριτηριακή αξιολόγηση δικτύων ασυρμάτων αισθητήρων, υψηλής χωρικής πυκνότητας για περιβαλλοντικές εφαρμογές" (Διδακτορική Διατριβή). Αθήνα: ΣΑΤΜ, ΕΜΠ.

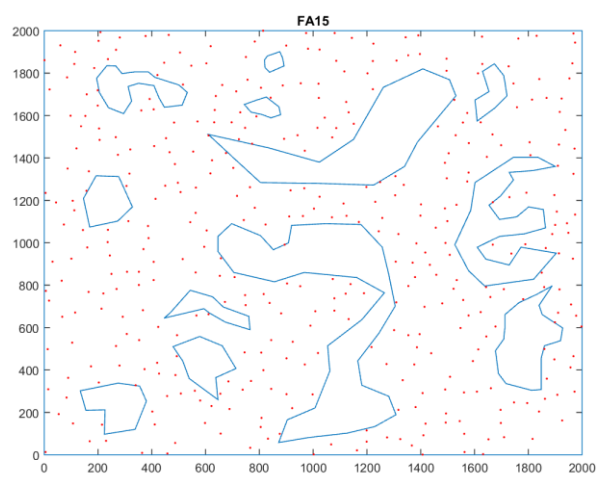
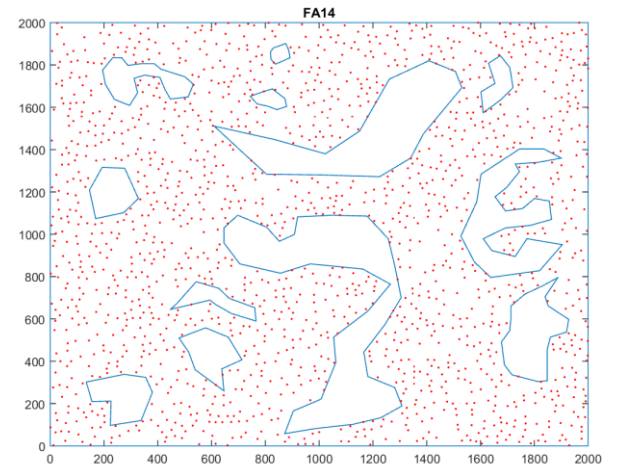
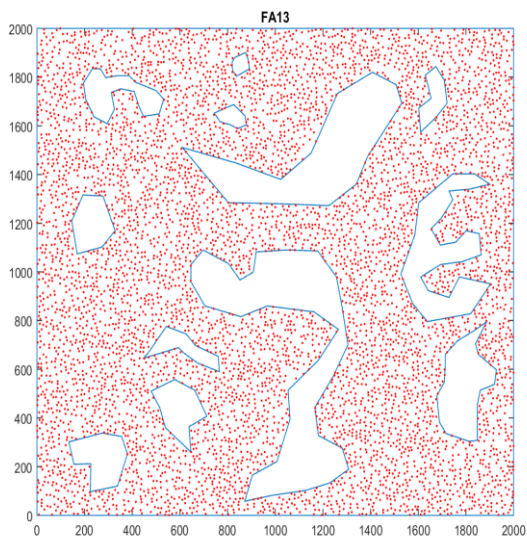
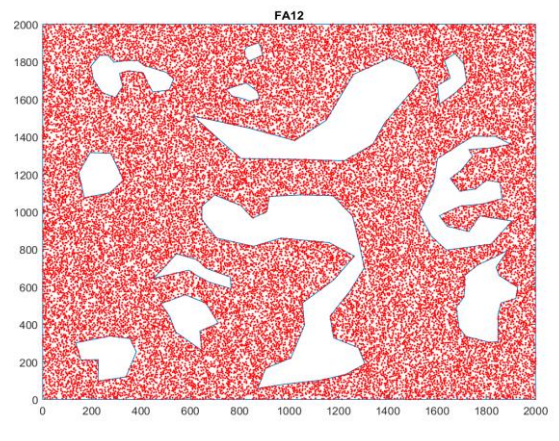
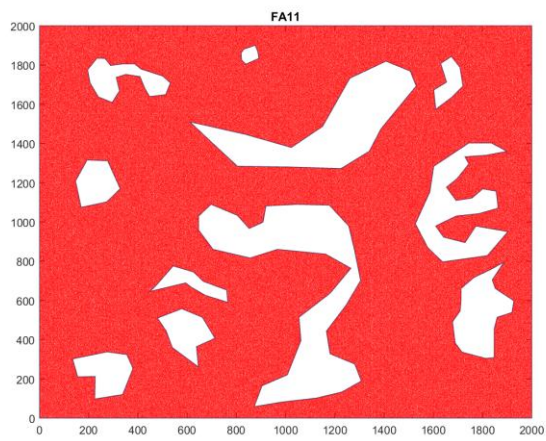


## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

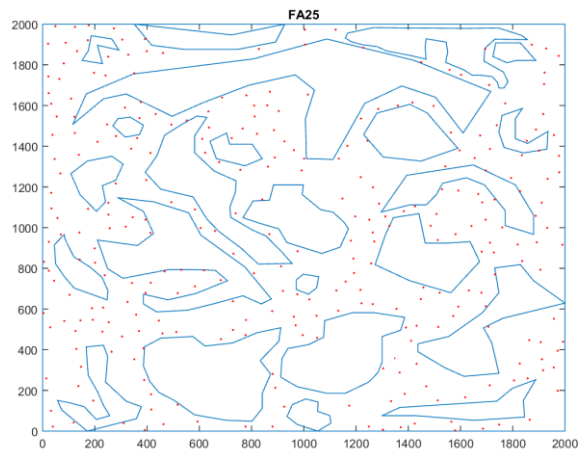
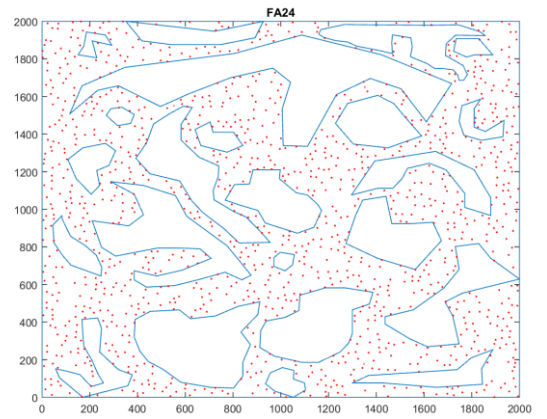
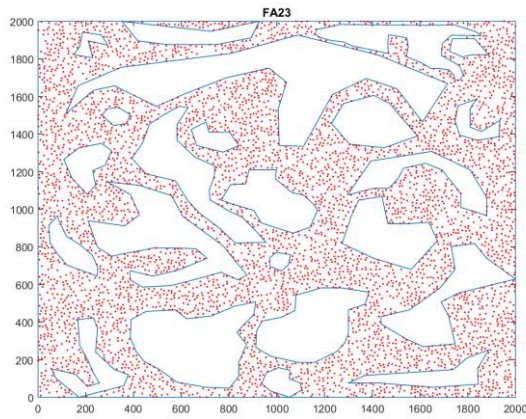
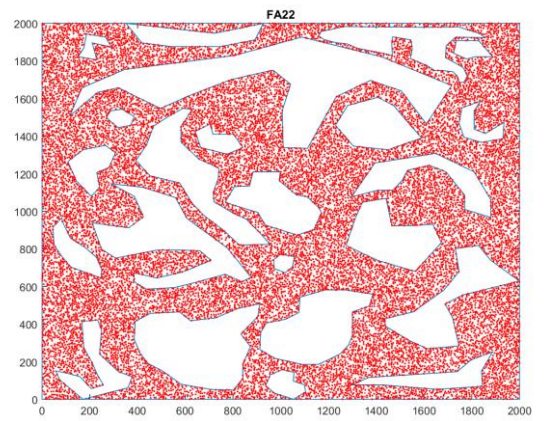
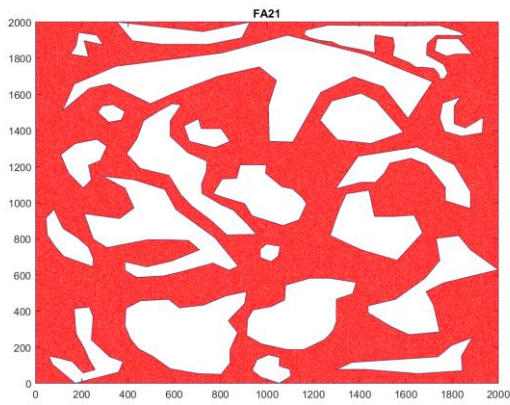
ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ  
ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΤΥΧΑΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ



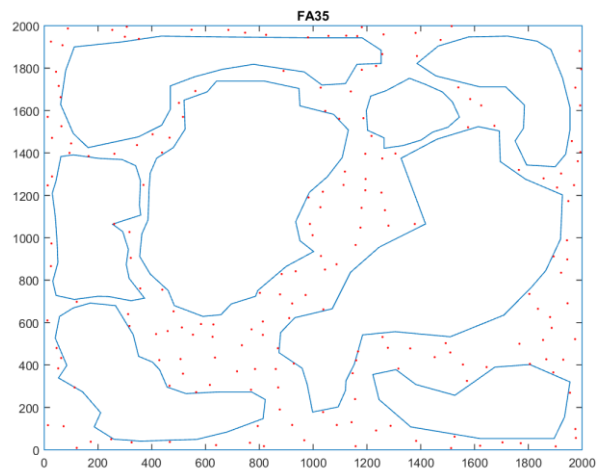
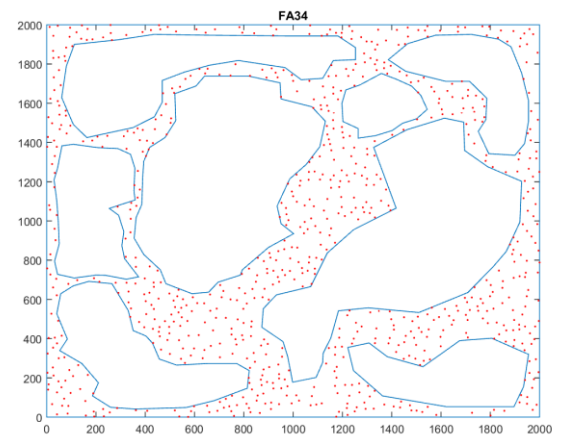
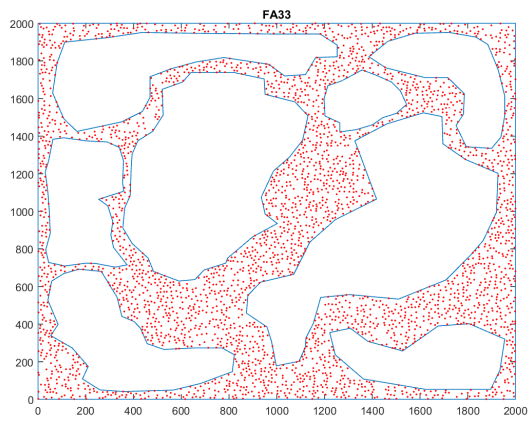
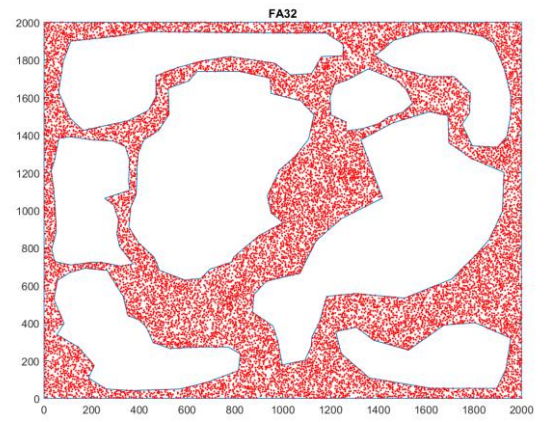
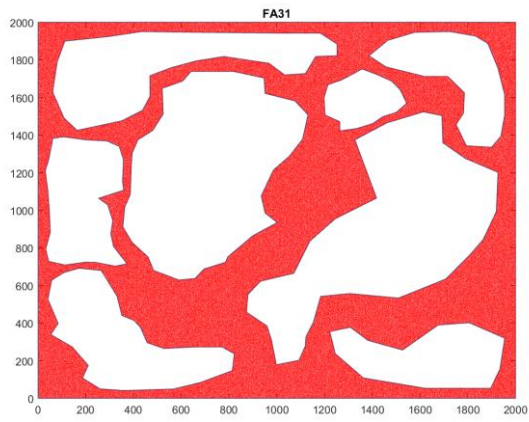
*Σετ σεναρίων «FA0»*



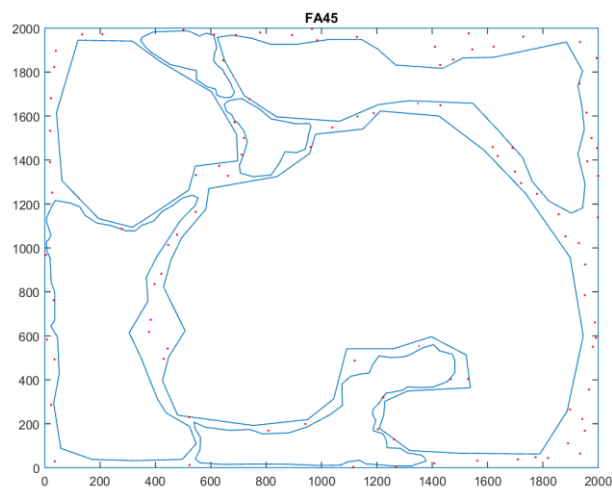
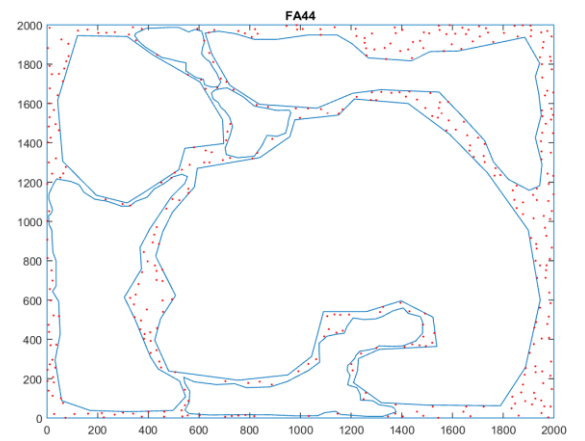
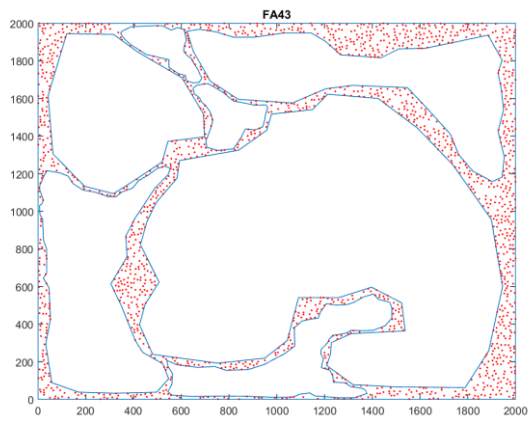
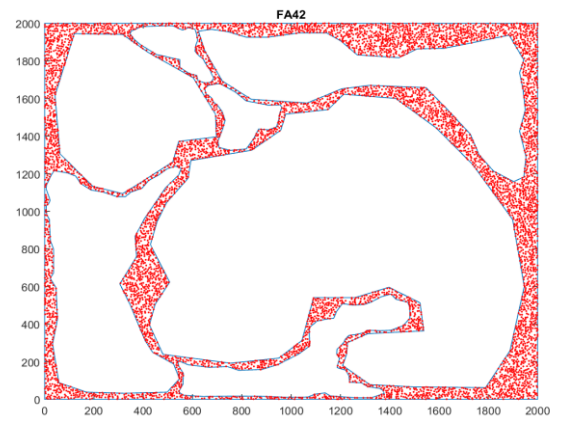
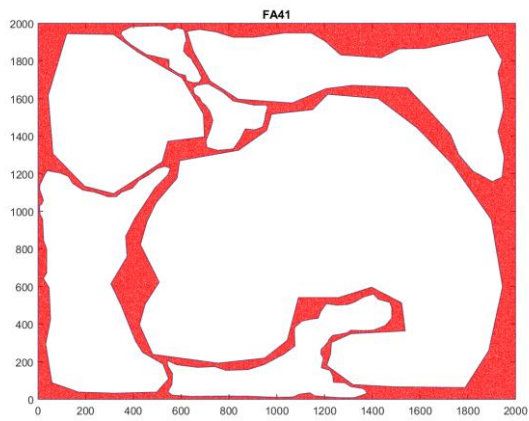
*Σετ σεναρίων «FA1»*



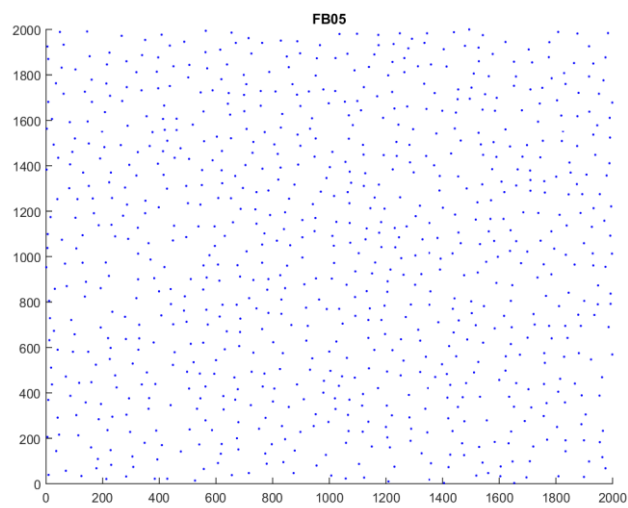
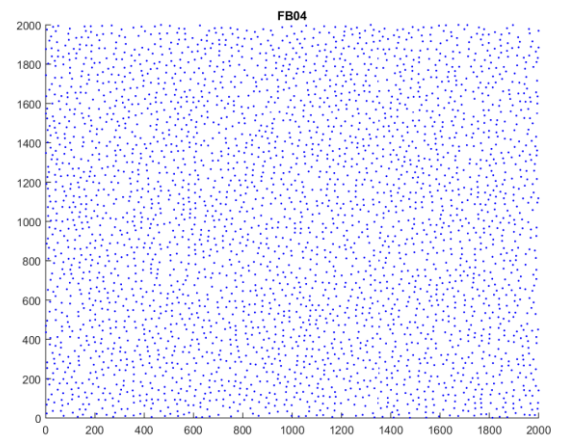
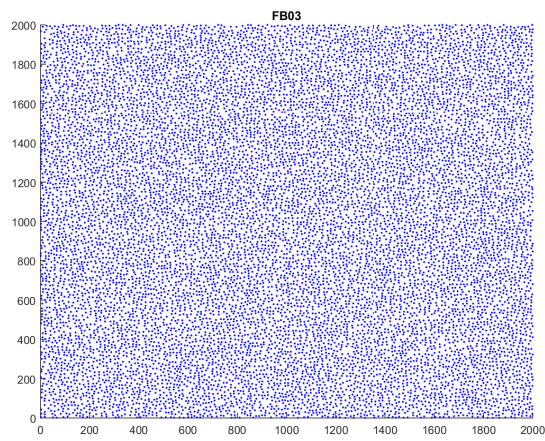
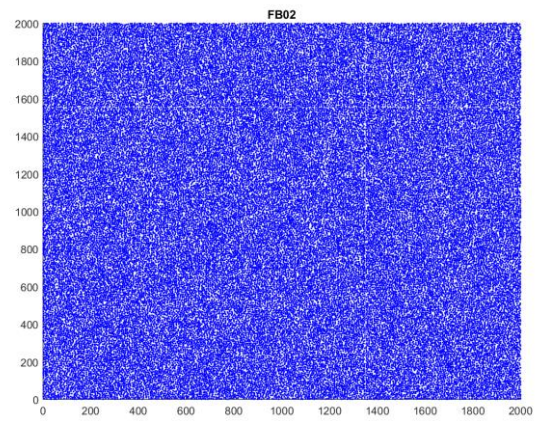
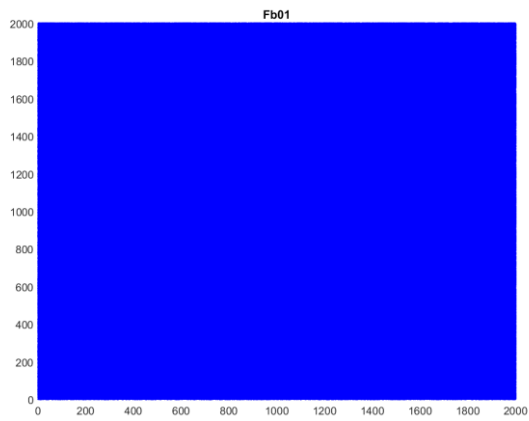
*Σετ σεναρίων «FA2»*



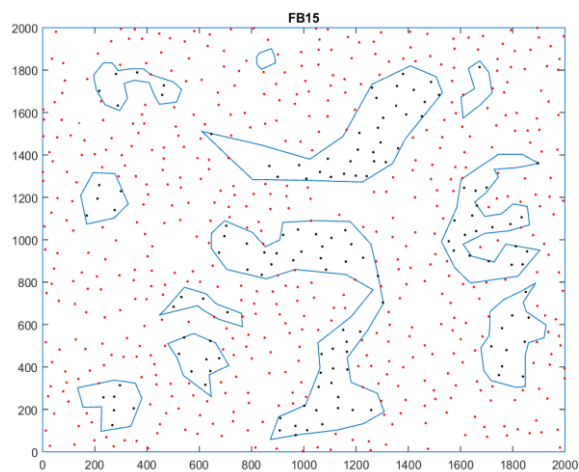
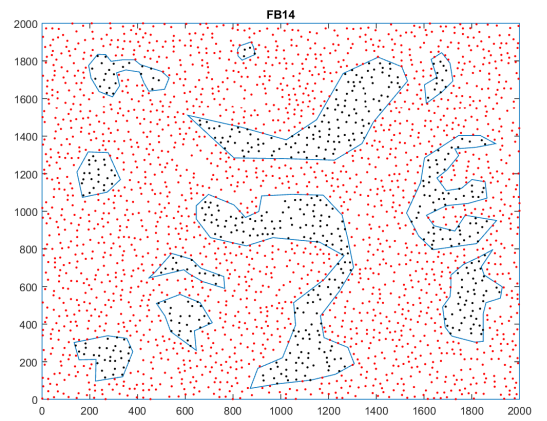
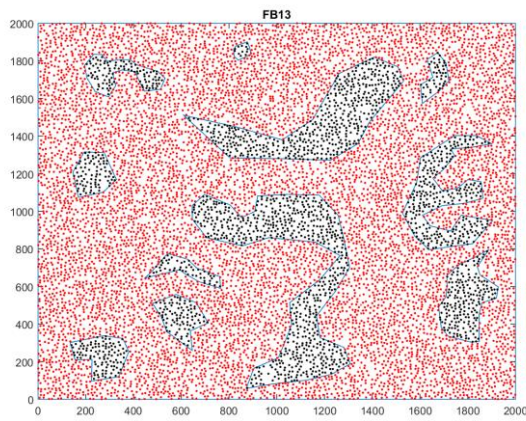
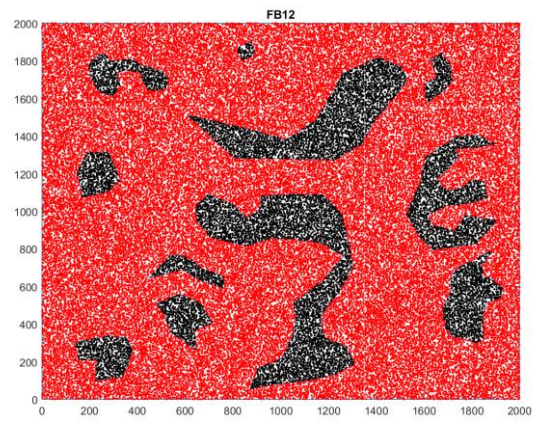
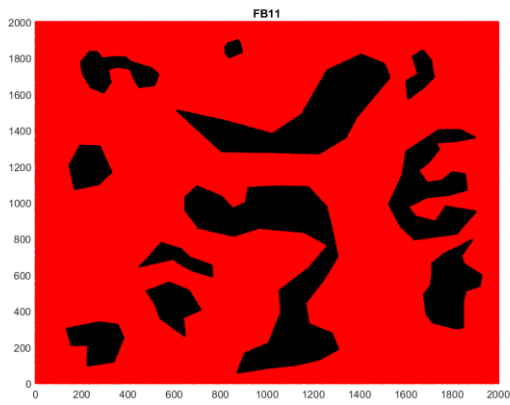
*Σετ σεναρίων «FA3»*



Σετ σεναρίων «FA4»

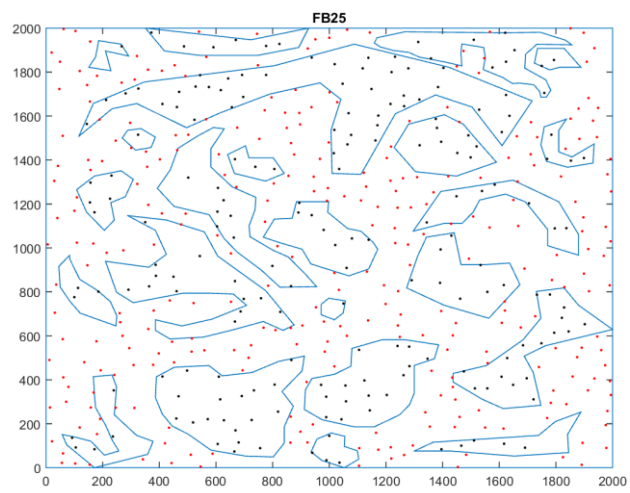
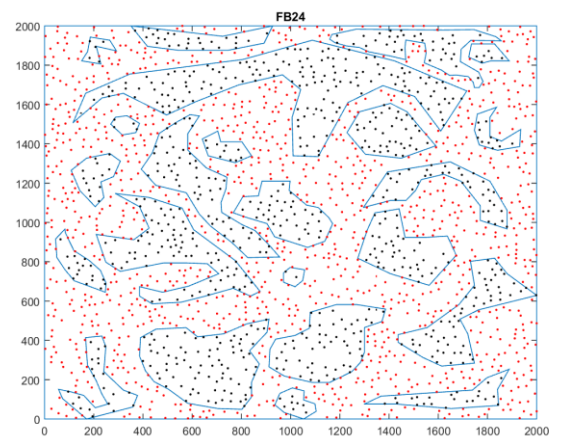
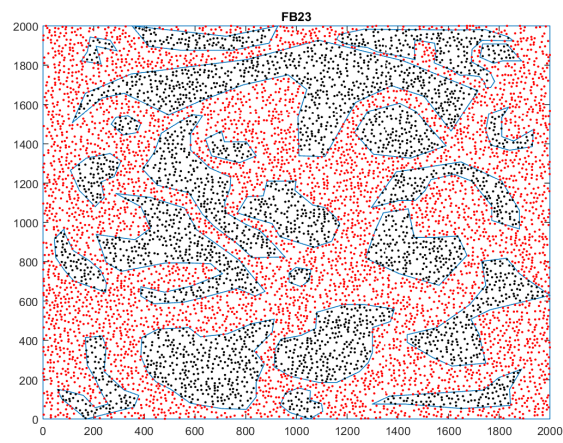
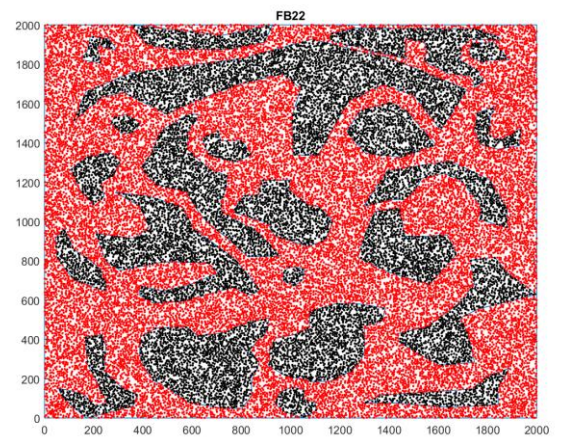
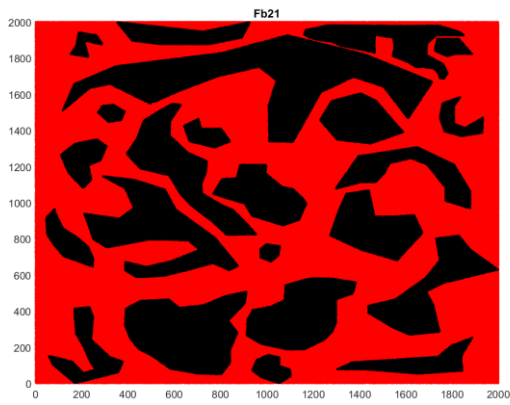


*Σετ σεναρίων «FB0»*

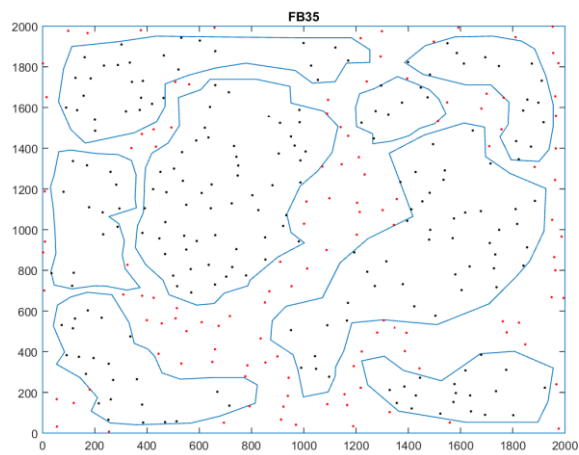
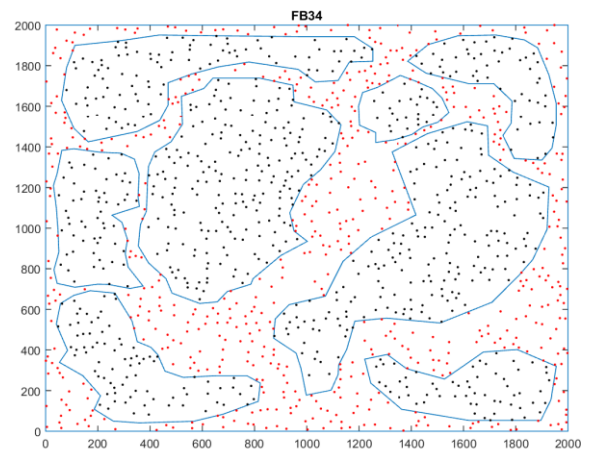
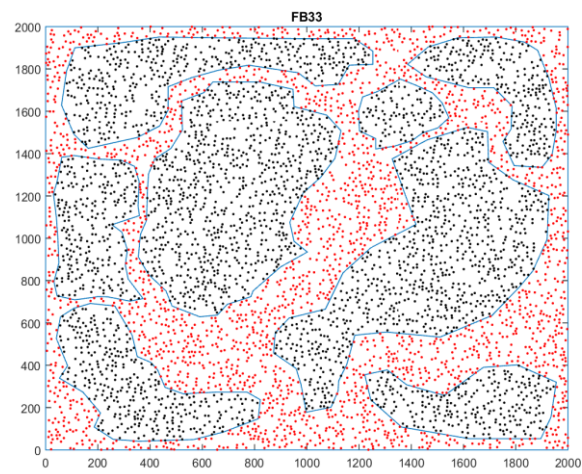
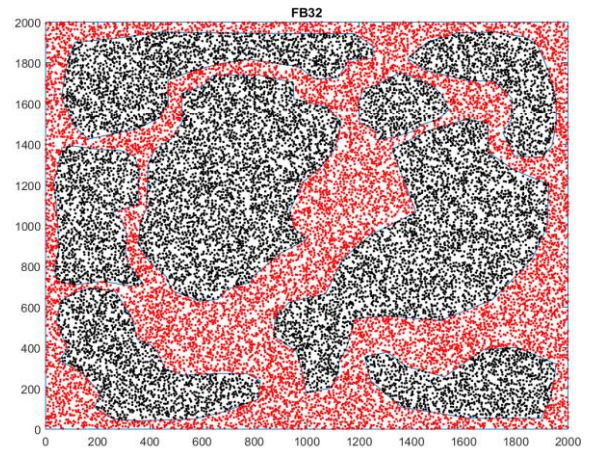
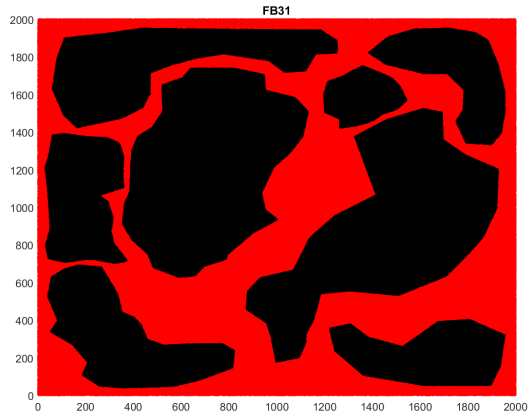


Σετ σεναρίων «FB1»

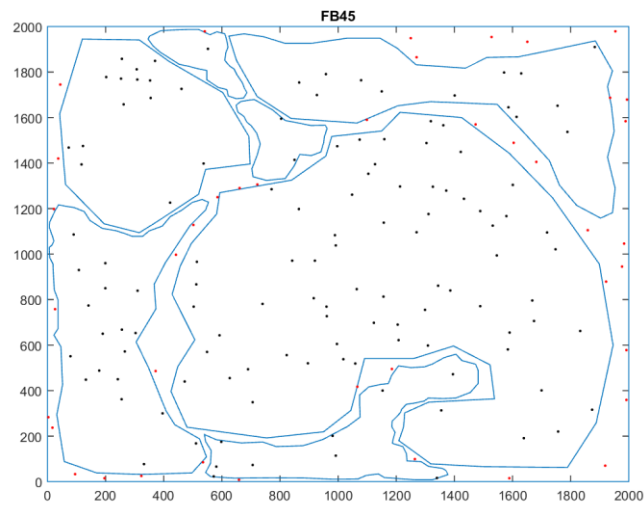
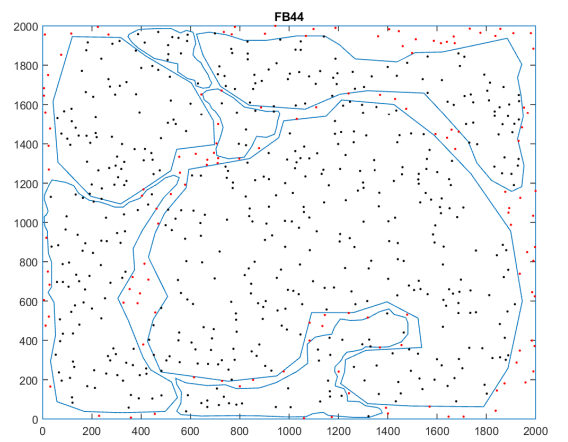
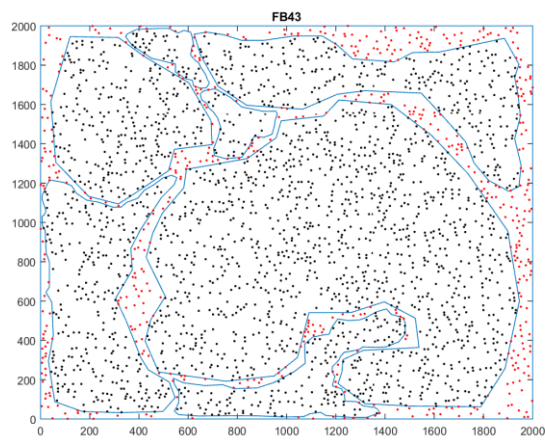
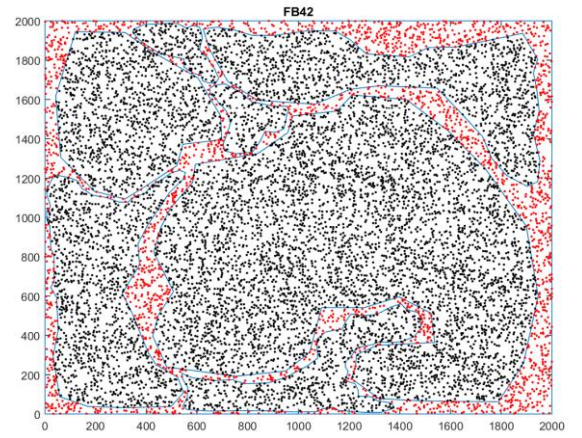
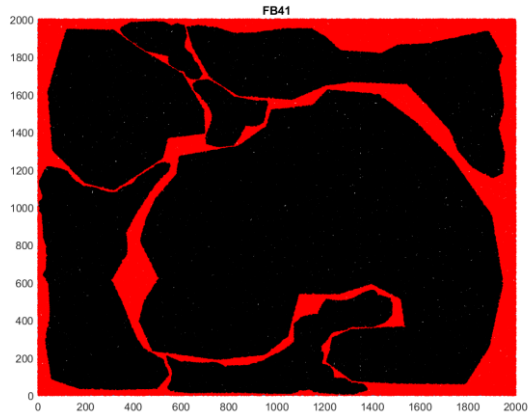




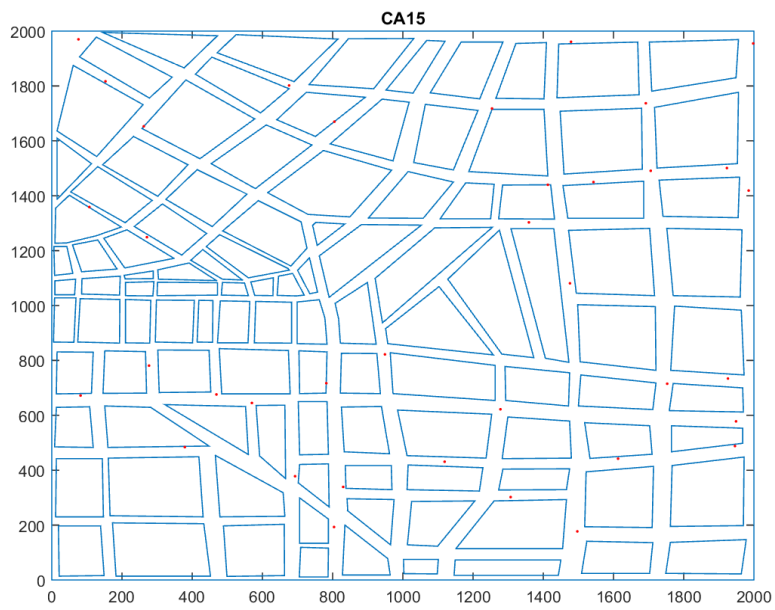
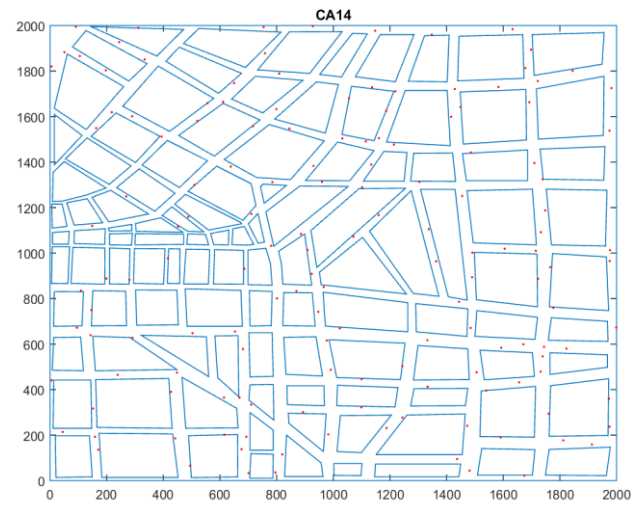
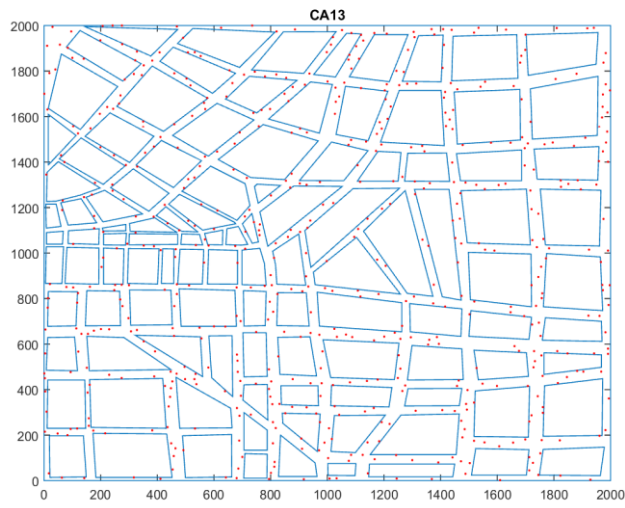
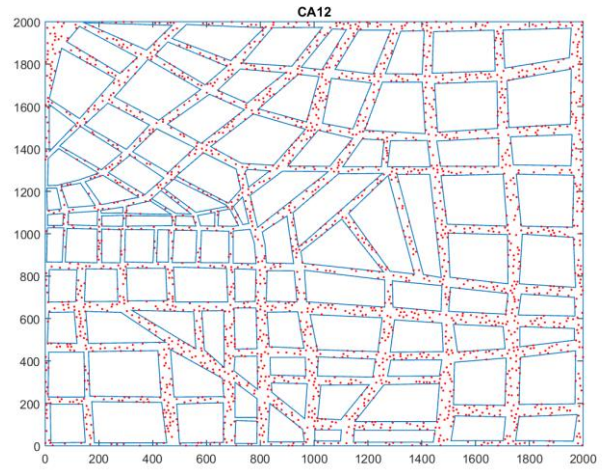
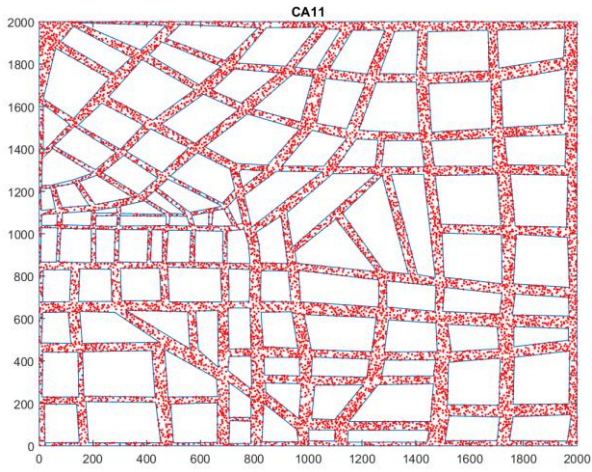
*Σετ σεναρίων «FB2»*



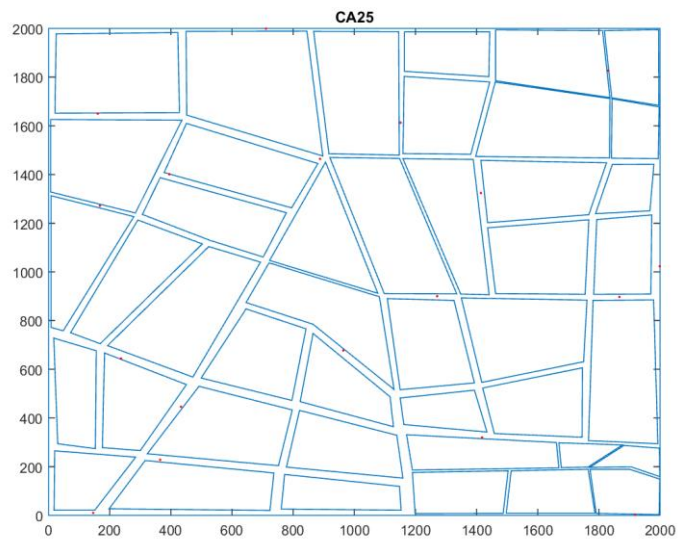
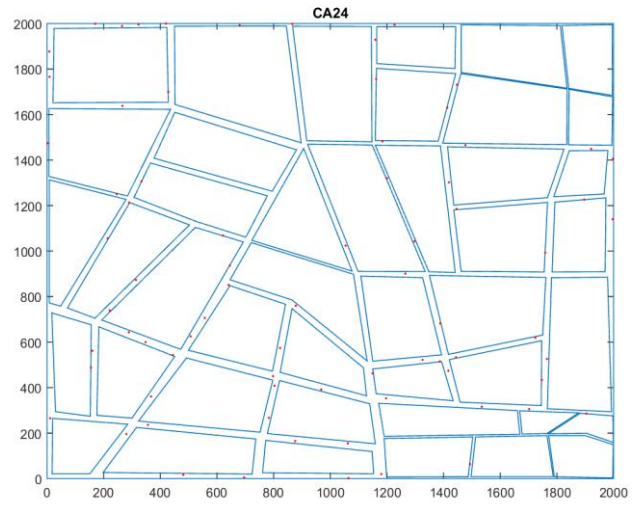
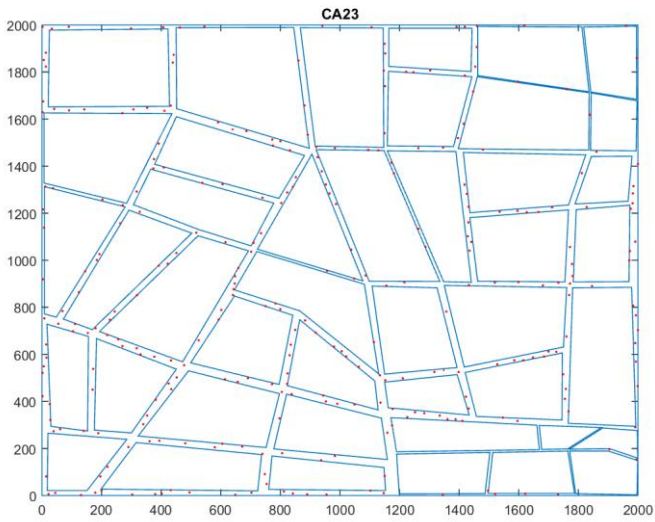
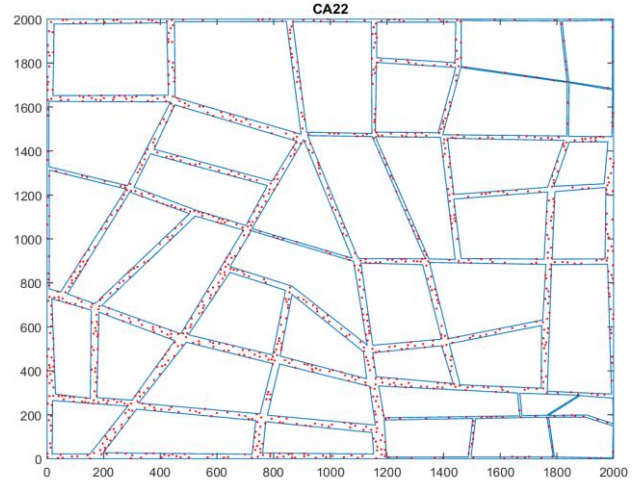
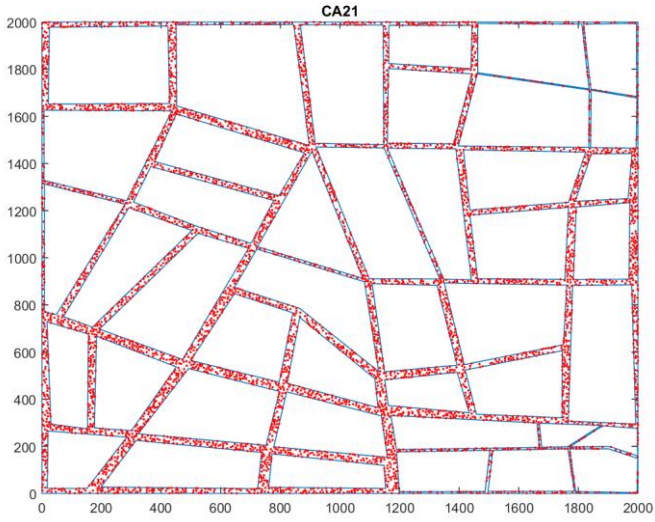
Σετ σεναρίων «FB3»



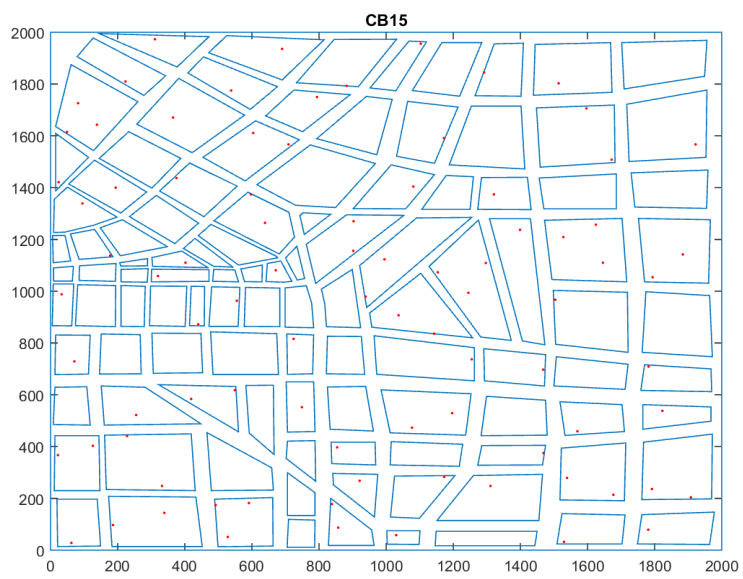
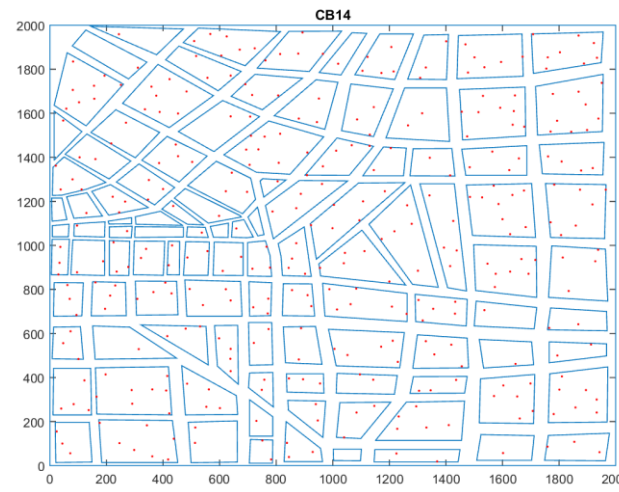
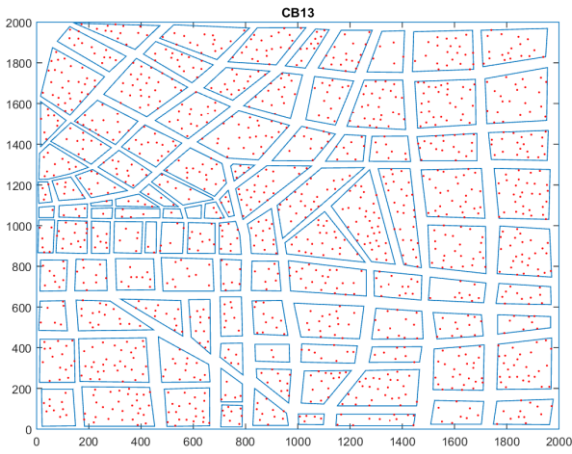
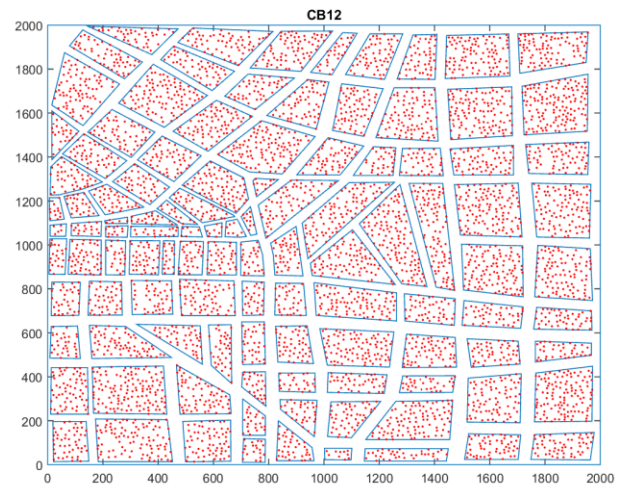
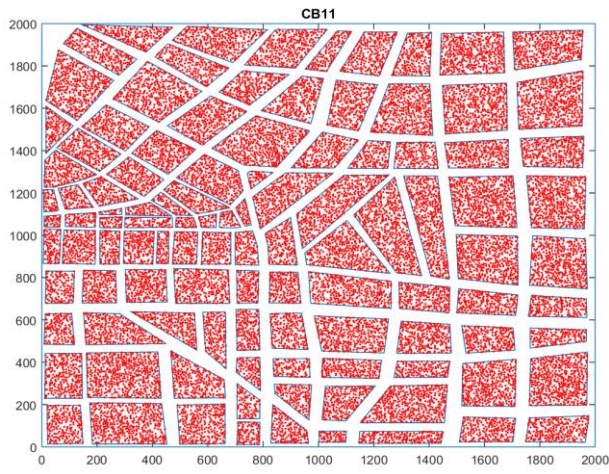
Σετ σεναρίων «FB4»



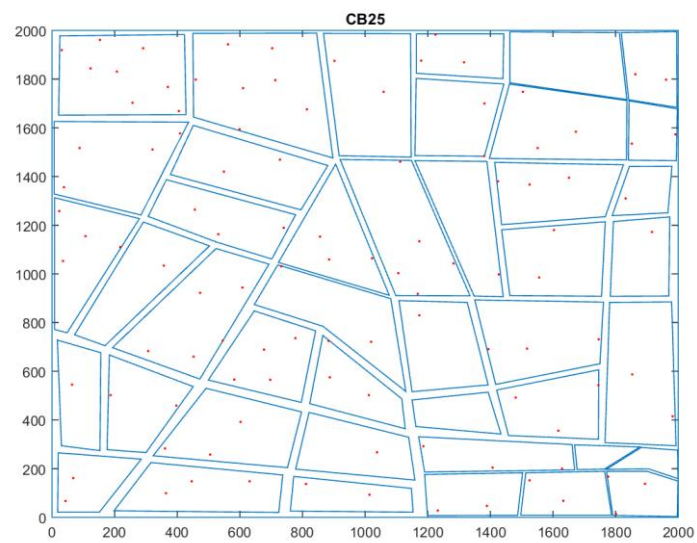
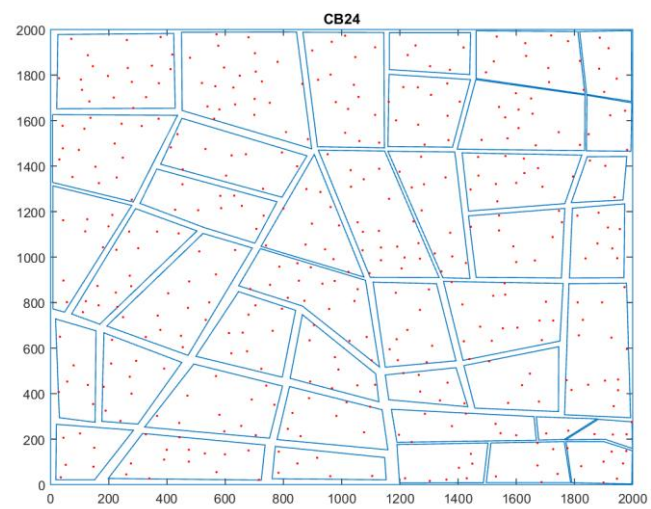
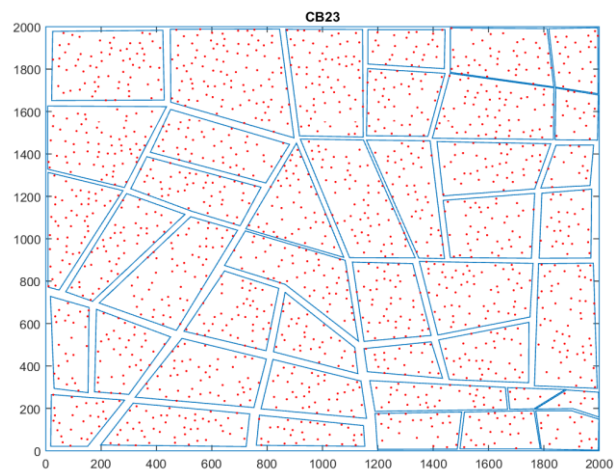
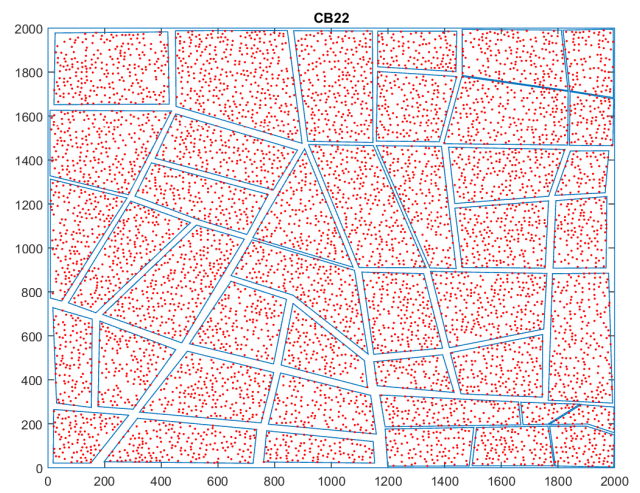
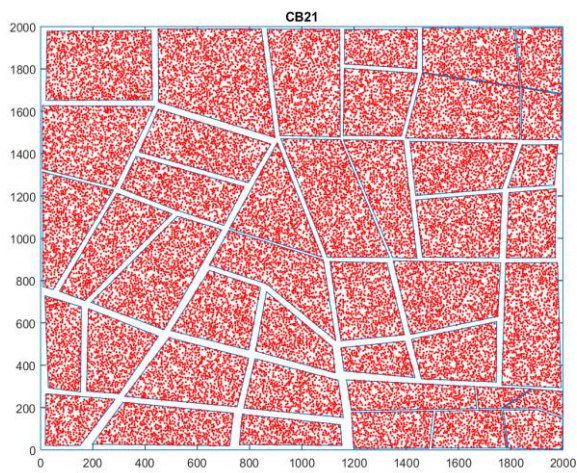
*Σετ σεναρίων «CA1»*



*Σετ σεναρίων «CA2»*



Σετ σεναρίων «CB1»



*Σετ σεναρίων «CB2»*