



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
UNIVERSITY OF PELLOPONNESE

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΑΘΜΩΝ ΒΑΣΗΣ  
ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΑΔΙΟΚΑΛΥΨΗ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ GSM-R**

ΒΛΑΓΚΟΥΛΗΣ Δ. ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΑΜ: 2008104

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ:

ΕΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΑΘΑΝΑΣΙΑΔΟΥ ΓΕΩΡΓΙΑ

ΕΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΤΣΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2010

## Περίληψη

Αντικείμενο της πτυχιακής εργασίας είναι η αυτοματοποιημένη τοποθέτηση σταθμών βάσης για τη βέλτιστη ραδιοκάλυψη στο ασύρματο δίκτυο GSM-R κατά μήκος του βασικού σιδηροδρομικού άξονα ΠΑΘΕΠ (Πάτρα – Αθήνα – Θεσσαλονίκη – Ειδομένη – Προμαχώνας) με το μικρότερο κόστος, δηλαδή τον ελάχιστο δυνατό αριθμό σταθμών βάσης (base stations). Σε αυτή την εργασία θα εξεταστούν δύο αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, ο Συνδυαστικός Αλγόριθμος για Ολική Βελτιστοποίηση ή Combination Algorithm for Total Optimization (CAT) και ο Άπληστος Αλγόριθμος ή Greedy Algorithm. Αρχικά θα εφαρμοστεί ο αλγόριθμος CAT και στη συνέχεια ο αλγόριθμος GR θα εφαρμοστεί στην τελική λύση που δίνει ο αλγόριθμος CAT με σκοπό την μείωση ακόμα περισσότερο του αριθμού σταθμών βάσης. Οι δύο αλγόριθμοι προσομοιώθηκαν σε Matlab και συγκρίθηκαν ως προς την πολυπλοκότητα και την αποτελεσματικότητά τους στην εύρεση της βέλτιστης λύσης για την πλήρη κάλυψη κατά μήκος του σιδηρόδρομου.

Από τα αποτελέσματα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο αλγόριθμος CAT είναι αποτελεσματικός και σχετικά γρήγορος για την εύρεση της βέλτιστης λύσης για την πλήρη κάλυψη κατά μήκος του σιδηρόδρομου. Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο Greedy στη λύση του CAT αλγορίθμου, προκύπτει είτε καλύτερη λύση είτε απλά επιβεβαιώνεται ότι η λύση που δίνει ο CAT είναι η βέλτιστη.

## Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Περιεχόμενα	3
1 Εισαγωγή	5
1.1 Ευρωπαϊκό σύστημα σιδηροδρόμων	5
1.2 Περιγραφή GSM-R	6
1.3 Σιδηροδρομικές εφαρμογές	7
1.4 Σιδηροδρομικό δίκτυο	8
2 Ραδιοκάλυψη σιδηροδρομικού δικτύου	9
2.1 Προϋποθέσεις ραδιοκάλυψης	9
2.2 Διαστασιοποίηση σταθμών βάσης	11
2.3 Ισχύς ακτινοβολίας σταθμών βάσης	12
2.4 Απώλειες διάδοσης	13
2.5 Χωρητικότητα GSM-R δικτύου	15
3 Αλγόριθμοι τοποθέτησης σταθμών βάσης	17
3.1 Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης τοποθέτησης	17
3.2 Συνδυαστικός αλγόριθμος	18
3.3 Άπληστος αλγόριθμος	19
4 Εφαρμογή αλγορίθμων στο GSM-R δίκτυο	21
4.1 Πιθανές θέσεις σταθμών βάσης	21
4.2 Σημεία ελέγχου	23
4.3 Υπολογισμός ραδιοκάλυψης	24
4.4 Εφαρμογή συνδυαστικού αλγορίθμου CAT	25
4.5 Εφαρμογή άπληστου αλγορίθμου Greedy	28
5 Ανάλυση αποτελεσμάτων	30
5.1 Αριθμός επαναλήψεων αλγορίθμου	30
5.2 Αριθμός ομάδων σταθμών βάσης	31
5.3 Εφαρμογή για όλα τα σενάρια	33
5.3.1 Κιάτο – Σιδηροδρομικό Κέντρο Αχαρνών – Αεροδρόμιο	33
5.3.2 Πειραιάς – Σιδηροδρομικός Σταθμός Αθηνών – Τιθορέα	42
5.3.3 Δομοκός – Λάρισα – Θεσσαλονίκη	51

5.3.4	Θεσσαλονίκη – Προμαχώνας	59
	Συμπεράσματα	69
	Παράρτημα	74
Π.1	Κύριο script αρχείο "main.m"	74
Π.2	Αρχείο δεδομένων σταθμών βάσης "base_stations.m"	77
Π.3	Αρχείο δεδομένων σημείων ελέγχου "control_nodes.m"	79
Π.4	Αρχείο υπολογισμού ραδιοκάλυψης "coverage.m"	83
Π.5	Αρχείο υπολογισμού απόστασης μεταξύ σημείων "haversine.m"	84
Π.6	Αρχείο υπολογισμού συνδυασμών σταθμών βάσης "bscomb.m"	86
Π.7	Αρχείο CAT αλγόριθμου "catalgorithm.m"	87
Π.8	Αρχείο OCA αλγόριθμου "oca.m"	88
Π.9	Αρχείο Greedy αλγόριθμου "greedy.m"	88

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Ευρωπαϊκό σύστημα σιδηροδρόμων

Όλα τα σιδηροδρομικά δίκτυα πρέπει να παρέχουν σύγχρονες, αξιόπιστες, ασφαλείς και χαμηλού κόστους υπηρεσίες μεταφοράς που να καλύπτουν τις ανάγκες τόσο των επιβατών όσο και της μεταφοράς εμπορευμάτων. Οι Ελληνικοί Σιδηρόδρομοι, όπως και τα άλλα Ευρωπαϊκά Σιδηροδρομικά Δίκτυα, προβλέπουν μεγάλη αύξηση στην κυκλοφορία και ως εκ τούτου εκσυγχρονίζονται βελτιώνοντας τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας των σιδηροδρόμων, όπως η ασφάλεια, η αξιοπιστία, η διαθεσιμότητα και η αποτελεσματική διαχείριση της κυκλοφορίας.

Από την άλλη πλευρά, απαιτείται η συμμόρφωση των Ελληνικών Σιδηροδρόμων προς τις απαιτήσεις των Ευρωπαϊκών Προτύπων Διαλειτουργικότητας καθώς και τη σύνδεσή τους με τους κεντρικούς Διευρωπαϊκούς Άξονες. Επομένως, οι Ελληνικοί Σιδηρόδρομοι πρέπει να μπορούν να βασιστούν σε κατάλληλα συστήματα ελέγχου και προστασίας συρμών και τηλεπικοινωνιακά συστήματα κινητών επικοινωνιών που καλύπτουν τεχνολογίες GSM-R για μετάδοση φωνητικών μηνυμάτων και δεδομένων, σε συμμόρφωση προς την τυποποίηση και τις οδηγίες διαλειτουργικότητας του Συστήματος Διαχείρισης Κυκλοφορίας Ευρωπαϊκών Σιδηροδρόμων (ERTMS) [10]. Το ERTMS είναι ένα σύγχρονο, πολύπλοκο σύστημα ελέγχου, το οποίο καλύπτει όλες τις δραστηριότητες για την επίτευξη ενός ομοιογενούς Ευρωπαϊκού συστήματος σηματοδότησης για την κυκλοφορία των συρμών. Το κύριο συστατικό του ERTMS είναι το Ευρωπαϊκό Σύστημα Ελέγχου Συρμών (ETCS) ενώ παρέχει και τη λειτουργία της Αυτόματης Προστασίας Συρμών.

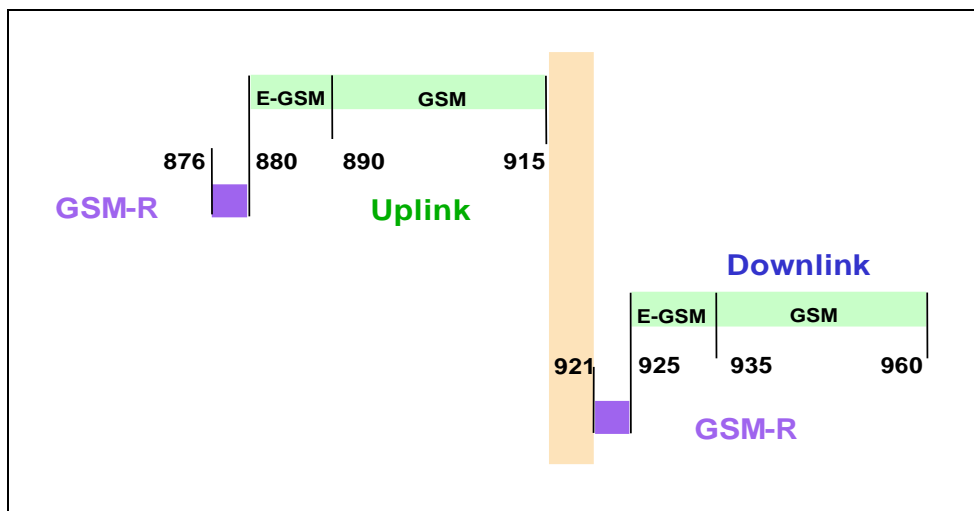
Το 1992, η Διεθνής Ένωση Σιδηροδρόμων UIC αναγνώρισε την τεχνολογία GSM ως την ιδανική πλατφόρμα για ένα νέο, ψηφιακό σύστημα κινητών επικοινωνιών για τους σιδηροδρόμους. Η προδιαγραφή του προτύπου ψηφιακής ασύρματης τεχνολογίας GSM-R αποτελεί τμήμα του έργου EIRENE (European Integrated Railway Radio Enhanced Network). Το 1995 ξεκίνησε το έργο MORANE (Mobile Radio for Railway Networks in Europe) προκειμένου να επικυρώσει και πιστοποιήσει τις απαιτήσεις του EIRENE. Οι δοκιμές MORANE πραγματοποιήθηκαν με βιομηχανικούς εταίρους στη Γαλλία, τη Γερμανία και την Ιταλία.

Το GSM-R προσθέτει ψηφιακή προσαρμοστικότητα και χαρακτηριστικά έξυπνου δικτύου στις λειτουργίες επικοινωνιών και ασφάλειας του συμβατικού συστήματος ασύρματης επικοινωνίας συρμών. Το σύστημα GSM-R είναι μοναδικό δεδομένου ότι όχι μόνο ενσωματώνει τις υπάρχουσες εφαρμογές κινητού ασύρματου συστήματος στο περιβάλλον των σιδηροδρόμων αλλά παρέχει και μια κοινή πλατφόρμα επικοινωνίας για τα συστήματα αυτόματου ελέγχου συρμών όπως τα ERTMS/ETCS.

Με τον τρόπο αυτό, το GSM-R διασφαλίζει τα υψηλότερα επίπεδα διαθεσιμότητας, διαλειτουργικότητας, ευελιξίας, ποιότητας και ασφάλειας. Το GSM-R είναι το μοναδικό σύστημα κινητών επικοινωνιών φωνής και δεδομένων το οποίο λειτουργεί ήδη σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες (Γερμανία, Ελβετία, Ισπανία, Ιταλία, Σουηδία, Γαλλία, Φινλανδία, Ολλανδία, Αυστρία, Μ. Βρετανία, Βέλγιο).

## 1.2 Περιγραφή GSM-R

Το πρότυπο GSM-R αν και βασίζεται στην δοκιμασμένη και ώριμη πλέον τεχνολογία GSM, εκτός από τη χρήση διαφορετικών συχνοτήτων (876-880 MHz uplink, 921-925 MHz downlink), προσδιορίζει και αρκετές τροποποιήσεις και προσθήκες, ώστε να υποστηρίζονται οι λειτουργικές απαιτήσεις που επιβάλλει η σιδηροδρομική χρήση του συστήματος GSM. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων στην περιοχή των 900 MHz.



Σχήμα 1.1: Φάσμα συχνοτήτων GSM 900

Η αδιαπραγμάτευτη απαίτηση για υψηλή ασφάλεια στην κίνηση των συρμών επιβάλλει στο δίκτυο GSM-R τέλεια κάλυψη (coverage), υψηλή ποιότητα εξυπηρέτησης (quality of service), υψηλή αξιοπιστία (redundancy) και διαθεσιμότητα (availability), ενώ πιθανή κατάσταση εκτάκτου ανάγκης επιβάλλει ταχύτατη εγκατάσταση κλήσεων (fast call setup). Η κάλυψη του δικτύου θα πρέπει να περιλαμβάνει, ανεξαρτήτως της μορφολογίας του εδάφους, όλη την ιδιόμορφη έκταση του σιδηροδρομικού δικτύου (πλάτους μερικών δεκάδων μέτρων και μήκους πολλών χιλιάδων χιλιομέτρων), τις διάφορες συνήθως μεγάλου μήκους σήραγγες, καθώς και την περιοχή των σιδηροδρομικών σταθμών συμπεριλαμβανομένου και του

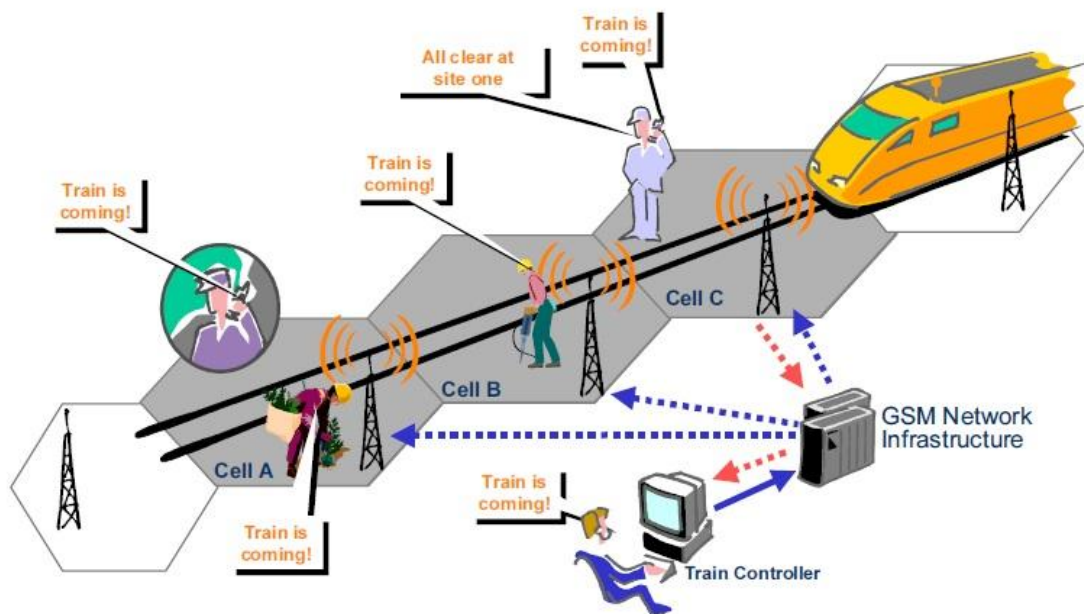
εσωτερικού των κτηρίων τους. Η υψηλή ποιότητας εξυπηρέτησης θα πρέπει να διατηρείται και στις επικοινωνίες τρένων πολύ υψηλών ταχυτήτων (>500 Km/h). Όλα τα παραπάνω σημαίνουν προχωρημένες τεχνικές μεταπομπών (handover), υψηλή απόδοση του ραδιοδικτύου, ακριβή και προσεκτικό σχεδιασμό των κυψελών.

### 1.3 Σιδηροδρομικές εφαρμογές

Ορισμένες εφαρμογές επικοινωνίας φωνής και δεδομένων που μπορούν να αναπτυχθούν και να υλοποιηθούν σε ένα δίκτυο GSM-R είναι:

- Επικοινωνία ελεγκτού κυκλοφορίας – μηχανοδηγού
- Αυτόματος έλεγχος συρμών
- Απομακρυσμένος έλεγχος εγκαταστάσεων και εξοπλισμού
- Μετάδοση μηνυμάτων ανά γεωγραφική περιοχή σε επείγουσες καταστάσεις
- Επικοινωνία κατά τη διενέργεια ελιγμών ή κατά τη σύνθεση αμαξοστοιχιών
- Επικοινωνία συνεργείων συντήρησης γραμμής
- Επικοινωνίες υποστήριξης της αμαξοστοιχίας και του προσωπικού της
- Τοπικές επικοινωνίες σε σιδηροδρομικούς σταθμούς και αμαξοστάσια
- Επικοινωνία ευρείας περιοχής
- Επικοινωνία επιβατών
- Επικοινωνία μηχανοδηγού – μηχανοδηγού

Ένα τυπικό παράδειγμα ενός ασύρματου δικτύου GSM-R φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 1.2: Ασύρματο δίκτυο GSM-R

#### 1.4 Σιδηροδρομικό δίκτυο

Το ασύρματο δίκτυο GSM-R στην Ελλάδα αναπτύσσεται κατά μήκος του βασικού σιδηροδρομικού άξονα ΠΑΘΕΠ (Πάτρα – Αθήνα – Θεσσαλονίκη – Ειδομένη – Προμαχώνας). Ο βασικός σιδηροδρομικός άξονας ΠΑΘΕΠ αποτελείται από τέσσερα μεγάλα τμήματα γραμμής, τα οποία και θα εξεταστούν στην εργασία αυτή.

- [1] Σταθμός Κιάτου – Σιδ/κό Κέντρο Αχαρνών (ΣΚΑ) – Αεροδρόμιο Αθηνών
- [2] Σταθμός Πειραιώς – Σταθμός Αθηνών – Σταθμός Τιθορέας
- [3] Σταθμός Δομοκού – Σταθμός Λάρισας – Σταθμός Θεσσαλονίκης
- [4] Σταθμός Θεσσαλονίκης – Σταθμός Προμαχώνα



## 2 Ραδιοκάλυψη σιδηροδρομικού δικτύου

Ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα που έχει να αντιμετωπίσει κάθε πάροχος ασύρματων κινητών τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών είναι η επιλογή σωστών τοποθεσιών για την εγκατάσταση σταθμών βάσεων. Το ίδιο ισχύει και για τον Οργανισμό Σιδηροδρόμων Ελλάδος (ΟΣΕ), ο οποίος είναι ο τηλεπικοινωνιακός πάροχος GSM-R υπηρεσιών. Ο στόχος του ΟΣΕ είναι η πλήρης ραδιοκάλυψη κατά μήκος του βασικού σιδηροδρομικού άξονα ΠΑΘΕΠ με το μικρότερο δυνατό κόστος, δηλαδή τον ελάχιστο αριθμό σταθμών βάσης παρέχοντας ταυτόχρονα υψηλής ποιότητας υπηρεσίες.

Κατά την μελέτη ραδιοκάλυψης του βασικού σιδηροδρομικού άξονα οι θέσεις των σταθμών βάσης επιλέχθηκαν ώστε να βρίσκονται εντός των ορίων απαλλοτρίωσης του ΟΣΕ. Η διάταξη των σταθμών βάσης κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής είναι τέτοια ώστε να παρέχουν διπλή κάλυψη δικτύου (redundancy). Οι σταθμοί βάσης θα συνδέονται εναλλάξ σε διαφορετικό Ελεγκτή Σταθμών Βάσης BSC (interleaved BSCs), έτσι ώστε σε περίπτωση διακοπής λειτουργίας του ενός BSC, οι μισοί σταθμοί βάσης που θα είναι συνδεδεμένοι στο άλλο BSC να παρέχουν ικανοποιητική κάλυψη δικτύου.

### 2.1 Προϋποθέσεις ραδιοκάλυψης

Στην Ευρώπη, τα δίκτυα GSM-R χρησιμοποιούν τις συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων [11]:

- 876 MHz – 880 MHz για την εκπομπή από σταθμό βάσης (uplink)
- 921 MHz – 925 MHz για τη λήψη από σταθμό βάσης (downlink)

Το κάθε φάσμα συχνοτήτων χωρίζεται σε 19 κανάλια τα οποία έχουν απόσταση μεταξύ τους 200 KHz (Σχήμα 2.1). Στη σχεδίαση των συχνοτήτων του ελληνικού δικτύου GSM-R έχουν χρησιμοποιηθεί και τα 19 διαθέσιμα κανάλια. Οι συχνότητες χρησιμοποιήθηκαν σε 9 ομάδες των 2 συχνοτήτων (Σχήμα 2.2). Η τελευταία συχνότητα του φάσματος, το κανάλι 973, δεν ανήκει σε καμία ομάδα συχνοτήτων. Αυτή η συχνότητα μένει ελεύθερη ώστε να αντικαταστήσει κάποια συχνότητα σε περιπτώσεις όπου δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί λόγω παρεμβολών. Κάθε ομάδα συχνοτήτων αντιστοιχεί σε κάθε ένα ζεύγος πομποδεκτών TRX. Επομένως, όπως θα δούμε και στην επόμενη παράγραφο, δημιουργούνται σταθμοί βάσης μίας και δύο ομάδων συχνοτήτων.

Το GSM-R χρησιμοποιεί διαμόρφωση GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) και επιπλέον χρησιμοποιεί πολυπλεξία στο πεδίο του χρόνου TDMA (Time Division

Multiple Access). Η μετάδοση για κάθε φέρουσα συχνότητα (carrier) γίνεται μέσω περιοδικών πλαισίων (frames), τα οποία διαιρούνται σε 8 χρονοθυρίδες (timeslots). Κάθε φέρουσα συχνότητα ονομάζεται φυσικό κανάλι και κάθε χρονοθυρίδα λογικό κανάλι.

A/A	Κανάλι	Συχνότητα Uplink (MHz)	Συχνότητα Downlink (MHz)
1	955	876,2	921,2
2	956	876,4	921,4
3	957	876,6	921,6
4	958	876,8	921,8
5	959	877,0	922,0
6	960	877,2	922,2
7	961	877,4	922,4
8	962	877,6	922,6
9	963	877,8	922,8
10	964	878,0	923,0
11	965	878,2	923,2
12	966	878,4	923,4
13	967	878,6	923,6
14	968	878,8	923,8
15	969	879,0	924,0
16	970	879,2	924,2
17	971	879,4	924,4
18	972	879,6	924,6
19	973	879,8	924,8

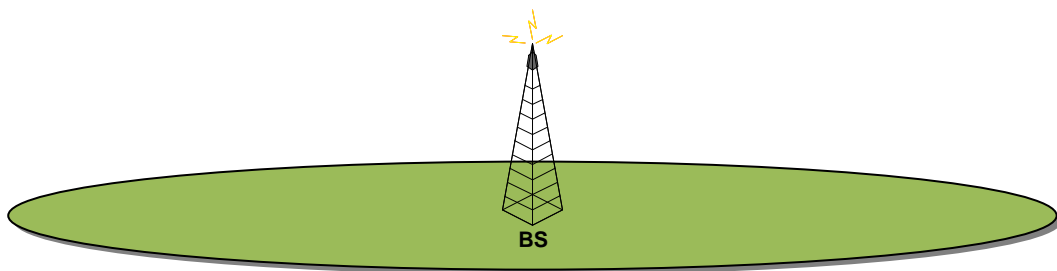
**Σχήμα 2.1: GSM-R συχνότητες**

Ομάδα	Συχνότητα 1	Συχνότητα 2
G1	955	964
G2	956	965
G3	957	966
G4	958	967
G5	959	968
G6	960	969
G7	961	970
G8	962	971
G9	963	972

**Σχήμα 2.2: Ομάδες συχνοτήτων**

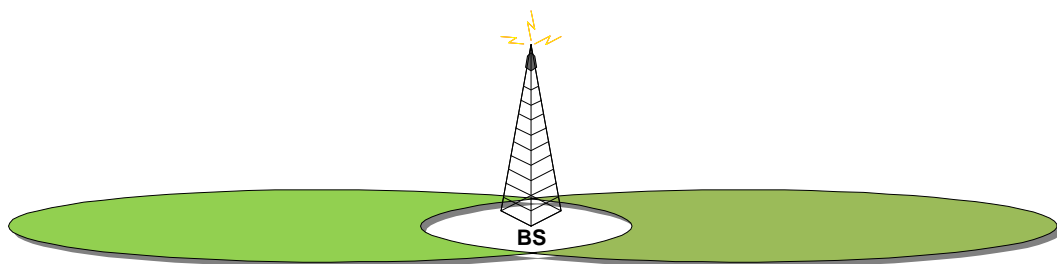
## 2.2 Διαστασιοποίηση σταθμών βάσης

Σε ένα δίκτυο GSM-R, οι τυπικές διαστασιοποιήσεις σταθμών βάσης που χρησιμοποιούνται είναι τρεις. Για την πρώτη διαστασιοποίηση, ο σταθμός βάσης αποτελείται 2 πομποδέκτες TRX δημιουργώντας μία κυψέλη (Σχήμα 2.3). Έχοντας μόνο μία σχεδόν ομοιοκατευθυντική κυψέλη μειώνεται ο αριθμός των μεταγωγών (handovers) κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής ενώ αυξάνεται ο συντελεστής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας. Η διαστασιοποίηση αυτή χρησιμοποιείται είτε σε μικρούς σιδηροδρομικούς σταθμούς είτε κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής.



**Σχήμα 2.3: Σταθμός Βάσης με 1 κυψέλη**

Η δεύτερη διαστασιοποίηση, που φαίνεται στο Σχήμα 2.4, αποτελείται συνολικά από 4 πομποδέκτες TRX δημιουργώντας 2 τομείς (sectors), δηλαδή 2 TRX ανά τομέα. Αυτή η διαστασιοποίηση χρησιμοποιείται κυρίως σε μεγάλους σιδηροδρομικούς σταθμούς ή αμαξοστάσια όπου αναμένεται αυξημένη κίνηση.



**Σχήμα 2.4: Σταθμός Βάσης με 2 τομείς**

Μόνο για το Σιδηροδρομικό Κέντρο Αχαρνών (ΣΚΑ), τον Εμπορευματικό Κέντρο Θριασίου και το Σιδηροδρομικό Σταθμό Θεσσαλονίκης χρησιμοποιείται η τρίτη διαστασιοποίηση, όπου αναμένεται αυξημένη τηλεπικοινωνιακή κίνηση και κινητικότητα τραίνων. Αυτή η διαστασιοποίηση αποτελείται από 4 πομποδέκτες TRX δημιουργώντας και αυτή 1 κυψέλη (Σχήμα 2.3), όπως και η πρώτη διαστασιοποίηση, όμως διαθέτει διπλάσιες διαθέσιμες συχνότητες.

Η σχεδίαση των γειτονικών κυψελών έχει γίνει με βάση το παρακάτω κριτήριο. Κάθε κυψέλη έχει ως γειτονικές κυψέλες τις δύο προηγούμενες και τις δύο επόμενες διπλανές κυψέλες κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η πραγματοποίηση μεταγωγών (handovers) ακόμα και στη περίπτωση της διακοπής λειτουργίας του ενός BSC. Αυτή είναι και η συνήθης τακτική που εφαρμόζεται σε GSM-R συστήματα.

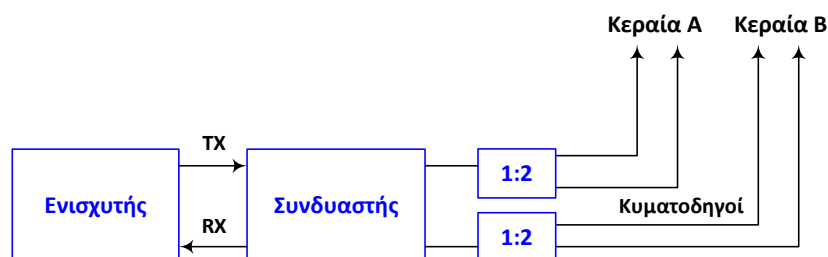
### 2.3 Ισχύς ακτινοβολίας σταθμών βάσης

Η ισχύς ακτινοβολίας στην έξοδο των κεραιών των σταθμών βάσης κατά μήκος της γραμμής υπολογίζεται βάσει των χαρακτηριστικών των κεραιών και του ισοζυγίου ισχύος για το ελάχιστο απαιτούμενο σήμα λήψης -84 dBm (ETCS level 2/3) στην κεραία του τραίνου σε ύψος 4 μέτρων από το έδαφος, για 50% location probability στα όρια της κυψέλης, θεωρώντας συγκεκριμένο κέρδος κεραίας και απώλειες διαδρομής. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα ελάχιστα επίπεδα σήματος ανά κατηγορία υπηρεσιών στο GSM-R.

Υπηρεσίες	99% πιθανότητα στα όρια κυψέλης	95% πιθανότητα στα όρια κυψέλης	50% πιθανότητα στα όρια κυψέλης
ETCS 1 (EIRENE)	-103 dBm	-98 dBm	-87 dBm
ETCS 2/3 (EIRENE)	-100 dBm	-95 dBm	-84 dBm
Προσωπικό ελιγμών	-96 dBm	-91 dBm	-80 dBm
Προσωπικό συντήρησης	-100 dBm	-95 dBm	-84 dBm

Σχήμα 2.5: Ελάχιστο επίπεδο σήματος

Ένας σταθμός βάσης αποτελείται από τον ενισχυτή, τον συνδυαστή, τους διαιρέτες ισχύος και τους κυματοδηγούς που μεταφέρουν το σήμα στις κεραιές. Το διάγραμμα ενός σταθμού βάσης με τα βασικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται φαίνεται στο σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Διάγραμμα σταθμού βάσης

Οι κεραιές των σταθμών βάσης που χρησιμοποιούνται είναι της εταιρείας Kathrein. Για κάθε κεραιά έχει επιλεγεί ο κατάλληλος τύπος ανάλογα με τις ανάγκες ραδιοκάλυψης και μπορεί να είναι ένας από τους τύπους που περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα.

Κεραίες	Οριζόντιο εύρος λοβού	Κατακόρυφο εύρος λοβού	Κέρδος
K739623	68°	10°	17 dBi
K741785	30°	7°	21 dBi

**Σχήμα 2.7: Τύποι κεραιών**

Επομένως παίρνοντας υπόψη την ισχύ εκπομπής στην έξοδο του ενισχυτή του σταθμού βάσης, τις απώλειες του συνδυαστή, του διαιρέτη ισχύος, των συνδετήρων και των κυματοδηγών αλλά και το κέρδος κεραιάς, μπορεί να υπολογιστεί η ισχύς ακτινοβολίας στην έξοδο της κεραιάς (EIRP) για κάθε σταθμό βάσης.

Ισχύς / Απώλειες	Περιγραφή
Ισχύς ενισχυτή	Ισχύς εκπομπής στην έξοδο του ενισχυτή (48 dBm)
Απώλειες συνδυαστή	Τιμές απωλειών συνδυαστή FDUAMCO: (2:2) = 2.2 dB, (4:2) = 5.4 dB
Απώλειες συνδετήρων (connector)	Απώλειες όλων των συνδετήρων κατά μήκος του κυματοδηγού ξεκινώντας από τον ενισχυτή
Απώλειες κυματοδηγού	Έχει επιλεγεί ο τύπος καλωδίου 7/8" LCF της RFS με απώλειες 3,84/100m στα 960MHz. Ως μήκος κυματοδηγού έχει θεωρηθεί το ύψος του ιστού
Απώλειες διαιρέτη ισχύος	Τυπικές απώλειες διαιρέτη 2:1 είναι 3 dB
Διάφορες επιπλέον απώλειες	Θεωρούνται 1 dB διάφορες επιπλέον απώλειες

**Σχήμα 2.8: Στοιχεία σταθμού βάσης**

#### 2.4 Απώλειες διάδοσης

Για τη μελέτη ραδιοκάλυψης του GSM-R δικτύου χρησιμοποιήθηκαν 2 κύρια μοντέλα κάλυψης εξωτερικού χώρου και 1 μοντέλο κάλυψης σήραγγας. Τα μοντέλα διάδοσης είναι:

- Αστικό μοντέλο (Urban), για τον υπολογισμό των απωλειών διάδοσης σε αστικό περιβάλλον εξωτερικού χώρου
- Μη αστικό μοντέλο (Open), για τον υπολογισμό των απωλειών διάδοσης σε μη αστικό περιβάλλον εξωτερικού χώρου
- Μοντέλο σήραγγας (tunnel), για τον υπολογισμό των απωλειών διάδοσης εντός του εσωτερικού χώρου μίας σήραγγας.

Για τα μοντέλα εξωτερικού χώρου χρησιμοποιείται η παρακάτω εξίσωση διάδοσης, η οποία υπολογίζει τις απώλειες ισχύος σε συνάρτηση της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη.

$$P_{\text{loss}} = - (A + B \log (d))$$

Οι παράμετροι A και B εξαρτώνται από το συγκεκριμένο μοντέλο διάδοσης και φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Παράμετρος	Αστικό μοντέλο (Urban)	Μη Αστικό μοντέλο (Open)
A	0.9	5.6
B	-36.3	-34.6

Σχήμα 2.9: Παράμετροι μοντέλων διάδοσης

Επιπλέον, στα μοντέλα εξωτερικού χώρου λαμβάνονται υπόψη και οι απώλειες λόγω της σκίασης  $X_s$ , δηλαδή λόγω της ανομοιομορφίας του περιβάλλοντος που διαδίδεται το σήμα. Τα ραδιοκύματα σκιάζονται από κτήρια και άλλες κατασκευές. Η λαμβανομένη ισχύς είναι στην πραγματικότητα μια τυχαία μεταβλητή που εξαρτάται από τον αριθμό και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των σκεδαστών, που συμμετέχουν στη διάδοση. Άρα οι τιμές της λαμβανόμενης ισχύς μπορεί να είναι αρκετά διαφορετικές από τη μέση τιμή που προβλέπουν τα μοντέλα απωλειών διάδοσης. Η σκίαση ακολουθεί κανονική (Gaussian) λογαριθμική κατανομή με μέση τιμή  $\mu = 0$  και τυπική απόκλιση  $\sigma = 7$  dB [8]. Επομένως, οι απώλειες ισχύος μεταξύ πομπού και δέκτη για τα μοντέλα εξωτερικού χώρου γίνεται:

$$P_{\text{loss}} = - (A + B \log (d)) + X_s$$

Για τον υπολογισμό των απωλειών διάδοσης σε σήραγγα χρησιμοποιείται το εκάστοτε μοντέλο διάδοσης εξωτερικού χώρου έως την είσοδο της σήραγγας και από την είσοδο της σήραγγας έως το σημείο υπολογισμού (συνήθως το κέντρο της σήραγγας) υπολογίζονται οι επιπλέον απώλειες βάσει της εξίσωσης απωλειών ελεύθερου χώρου προσαυξημένες από τις απώλειες λόγω διακύμανσης του σήματος (fading) και από τις απώλειες από στροφές στη σήραγγα και άλλα εμπόδια (margin).

$$PL(\text{dB}) = 20 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) + \text{Fading} + \text{Margin}$$

## 2.5 Χωρητικότητα GSM-R δικτύου

Για τον υπολογισμό της χωρητικότητας του GSM-R δικτύου θεωρήθηκε το μοντέλο κίνησης που φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Για κάθε πηγή κίνησης ορίζονται οι πιθανοί ενεργοί χρήστες του δικτύου και οι κίνηση ανά ώρα αιχμής για αυτούς τους χρήστες. Υπάρχουν δύο τύποι χρηστών, το τραίνο μέσω της ενσωματωμένης συσκευής επικοινωνίας στο χώρο του μηχανοδηγού και το υπόλοιπο προσωπικό μέσω των φορητών και σταθερών συσκευών. Οι τιμές των παραμέτρων κίνησης είναι τυπικές για δίκτυα GSM-R [10].

Πηγή κίνησης	Υπηρεσία	Χρήστης	Ενεργοί Χρήστες	Erlang ανά ΒΗ	Erlang ανά MS και ΒΗ
Μηχανοδηγοί	Φωνή	Τραίνο	100	2	0,02
Προσωπικό γραμμών (handheld)	Φωνή	Προσωπικό	200	8	0,04
Προσωπικό συντήρησης (handheld)	Φωνή	Προσωπικό	400	8	0,02
Προσωπικό σταθμών (handheld)	Φωνή	Προσωπικό	1000	30	0,03
Προσωπικό σταθμών (fixed terminal)	Φωνή	Προσωπικό	100	3	0,03
Κλήσεις Ευρείας Εκπομπής	Φωνή	Προσωπικό & Τραίνο	300	3	0,01
ETCS	Δεδομένα	Τραίνο	500	100	0,20
Λειτουργία Τραίνων	Δεδομένα	Τραίνο	1000	20	0,02
Κίνηση ανάμεσα σε PABX και GSM-R	Φωνή & Δεδομένα	Προσωπικό & Τραίνο	2000	20	0,01

**Σχήμα 2.10: Μοντέλο κίνησης του GSM-R δικτύου**

Από τον πίνακα προκύπτει η συνολική κίνηση ανά χρήστη MS (Mobile Subscriber) και ανά ώρα αιχμής ΒΗ (Busy Hour) αντίστοιχα για κάθε είδος χρήστη:

- Συνολική κίνηση χρήστη - τραίνο: 0.26 erlang
- Συνολική κίνηση χρήστη - προσωπικό: 0.14 erlang

Για κάθε κυψέλη ή τομέα τα λογικά κανάλια TS (timeslots) διατίθενται ως εξής:

- Κυψέλη ή τομέας με 2 TRX (16 TS):  
1 TS για BCCH + 1 TS για SDCCH + 2 TS για GPRS + 12 TS για φωνή και δεδομένα
- Κυψέλη με 4 TRX (32 TS):  
1 TS για BCCH + 2 TS για SDCCH + 2 TS για GPRS + 27 TS για φωνή και δεδομένα

Το BCCH (Broadcast Control Channel) κανάλι επιτρέπει σε όλους τους δέκτες να λαμβάνουν πληροφορία για το δίκτυο, όπως η ταυτότητα της κυψέλης και οι διαθέσιμες υπηρεσίες. Το SDCCCH (Stand-alone Dedicated Control Channel) κανάλι χρησιμοποιείται για τη μεταφορά μηνυμάτων του χρήστη όπως διαχείριση προώθησης κλήσης, μετάδοση σύντομων μηνυμάτων (SMS) και ενημέρωση θέσης. Επίσης, χρησιμοποιείται για τη μεταφορά σημάτων ελέγχου της κλήσης από και προς τον κινητό σταθμό κατά τη διάρκεια εγκαθίδρυσης της κλήσης (πιστοποίηση του χρήστη).

Αν ορίσουμε το Βαθμό Εξυπηρέτησης GoS (Grade of Service), το μέτρο της μέγιστης αποδεκτής πιθανότητας μια κλήση να χαθεί, στο 1% τότε η χωρητικότητα για κάθε διαστασιοποίηση σταθμού βάσει του μοντέλου Erlang-B είναι:

- Διαστασιοποίηση Α (12 TS, 1% GOS): 5.876 erlang
- Διαστασιοποίηση Β (12 TS, 1% GOS) x 2 sectors: 11.752 erlang
- Διαστασιοποίηση Γ (27 TS, 1% GOS): 17.797 erlang



### 3 Αλγόριθμοι τοποθέτησης σταθμών βάσης

Το κόστος και η πολυπλοκότητα ενός δικτύου σχετίζεται άμεσα με τον αριθμό των σταθμών βάσης BS (base stations) που απαιτούνται ώστε ένας πάροχος να προσφέρει τις κατάλληλες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες. Η τοποθέτηση των σταθμών βάσης δεν είναι μία απλή διαδικασία αφού υπάρχουν πολλοί συντελεστές που πρέπει να ληφθούν υπόψη έτσι ώστε να επιλεγεί η βέλτιστη θέση τους. Στόχος είναι η πλήρης ραδιοκάλυψη μιας περιοχής με το μικρότερο δυνατό κόστος.

#### 3.1 Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης τοποθέτησης

Ο βασικός στόχος της εργασίας αυτής είναι η εύρεση ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης τοποθέτησης σταθμών βάσης που θα λύσει το πρόβλημα της κάλυψης μιας περιοχής με τον ελάχιστο αριθμό από σταθμούς βάσης. Θα χρησιμοποιηθούν δύο αλγόριθμοι βελτιστοποίησης. Αρχικά θα αναφερθεί ο Συνδυαστικός Αλγόριθμος για Ολική Βελτιστοποίηση CAT (Combination Algorithm for Total Optimization) και ύστερα ο Άπληστος Αλγόριθμος GR (Greedy Algorithm) [1]. Ο αλγόριθμος GR θα εφαρμοστεί στην τελική λύση που δίνει ο αλγόριθμος CAT, με σκοπό την μείωση ακόμα περισσότερο του αριθμού σταθμών βάσης.

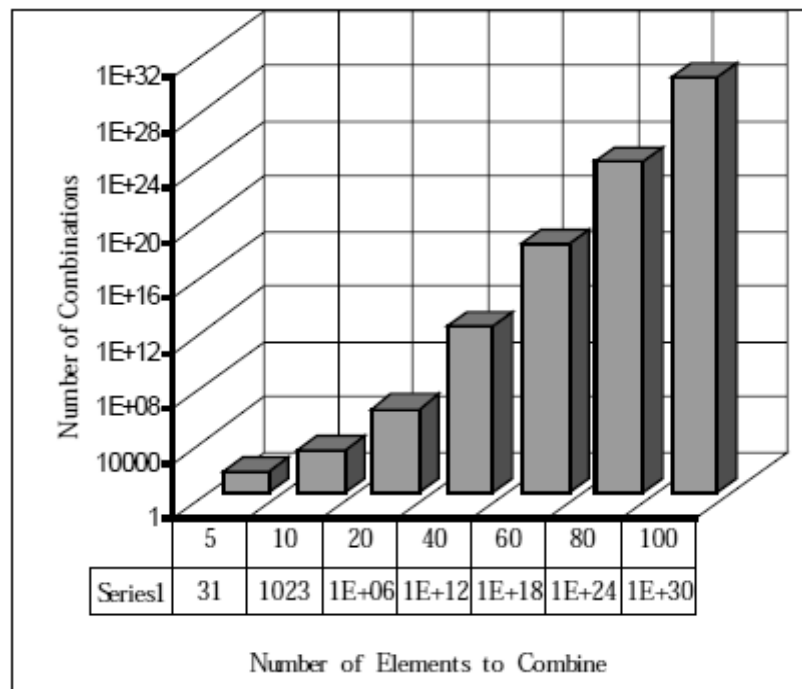
Η περιοχή ραδιοκάλυψης αναπαριστάται από μια ομάδα σημείων ελέγχου CN (control nodes). Τα σημεία ελέγχου επιλέγονται ώστε να αντιπροσωπεύουν όλες τις τοποθεσίες όπου η κάλυψη είναι απαραίτητη. Ο μέγιστος αριθμός των επιτρεπόμενων σημείων ελέγχου είναι απεριόριστος. Ο αρχικός αριθμός των σταθμών βάσης και των θέσεων τους ορίζονται εκ των προτέρων κάνοντας τον αλγόριθμο πιο αποδοτικό. Εάν δεν είναι γνωστές εξ αρχής οι πιθανές θέσεις των σταθμών βάσης τότε ο αλγόριθμος θα τοποθετήσει τις τελικές τους θέσεις οπουδήποτε στην περιοχή, συμπεριλαμβάνοντας και θέσεις όπως στη μέση μιας λίμνης. Μια τέτοια λύση του αλγορίθμου θα είναι χωρίς χρησιμότητα ακόμα και αν ικανοποιεί τις υπόλοιπες απαιτήσεις.

Αφού οριστούν οι τοποθεσίες των σημείων ελέγχου και οι πιθανές θέσεις σταθμών βάσης μιας περιοχής, ο αλγόριθμος πρέπει να παρέχει κάλυψη σε όλα τα σημεία ελέγχου χρησιμοποιώντας την μικρότερη ομάδα από τους πιθανούς σταθμούς βάσης. Ο αλγόριθμος παίρνει υπόψη του τόσο το μοντέλο διάδοσης όσο και το μοντέλο χωρητικότητας. Για να γίνει πιο απλή η διαδικασία μπορεί να επιλεγεί ίδια χωρητικότητα για όλα τα σημεία ελέγχου.

### 3.2 Συνδυαστικός αλγόριθμος

Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται στην ιδέα του συνδυασμού των πιθανών θέσεων των σταθμών βάσεων BS (Base Station). Αν συνδυαστούν όλοι οι πιθανοί σταθμοί βάσης στην περιοχή ενδιαφέροντος, μπορεί να βρεθεί η βέλτιστη ομάδα των σταθμών βάσης που παρέχουν κάλυψη στα σημεία ελέγχου που είναι διασκορπισμένα στη περιοχή. Μια ομάδα σταθμών βάσης μπορεί να οριστεί από έναν σταθμό βάσης έως το σύνολο των σταθμών βάσης της περιοχής. Σε πολλές περιπτώσεις, περισσότεροι από ένα συνδυασμό σταθμών βάσης μπορεί να βρεθούν. Σε τέτοιες περιπτώσεις, βάζοντας αυστηρότερους περιορισμούς βρίσκεται η βέλτιστη λύση του αλγορίθμου.

Ο ορισμός των πιθανών θέσεων των σταθμών βάσης εξ αρχής βοηθάει πάρα πολύ έναν συνδυαστικό αλγόριθμο. Όμως, ο αριθμός των συνδυασμών αυξάνεται δραματικά με την αύξηση του αριθμού των πιθανών σταθμών βάσης. Η αύξηση αυτή φαίνεται αναλυτικά στο παρακάτω σχήμα και έχει ως αποτέλεσμα, ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου να τείνει στο άπειρο.



Σχήμα 3.1: Συνδυασμοί συναρτήσει των σταθμών βάσης

Ο συνολικός αριθμός των συνδυασμών  $C_T$ , συναρτήσει του συνολικού αριθμού των σταθμών βάσης  $B$  και τον αριθμό των σταθμών βάσης ανά ομάδα  $G$ , δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_T = \sum_{G=1}^{G=B} \frac{B!}{G! (B-G)!}$$

Η εξίσωση εκφράζει τον Γνήσιο Συνδυαστικό Αλγόριθμο OCA (Original Combination Algorithm) [1].

Ο Συνδυαστικός Αλγόριθμος για Ολική Βελτιστοποίηση CAT χρησιμοποιεί την παραπάνω λογική του OCA αλγορίθμου, χωρίζοντας επιπλέον το σύνολο των πιθανών σταθμών βάσης σε έναν αριθμό από ομάδες από λιγότερους σταθμούς βάσης. Οι σταθμοί βάσης της κάθε ομάδας επιλέγονται τυχαία. Ο αριθμός των στοιχείων ανά ομάδα μπορεί να είναι αρκετά μικρός ώστε να επιτρέπει στον OCA αλγόριθμο να εκτελείται. Συνεπώς, για κάθε ομάδα βρίσκονται πολλαπλές λύσεις. Ο αλγόριθμος CAT επιλέγει τις λύσεις με το μικρότερο κόστος. Οι βέλτιστες λύσεις συγχωνεύονται σε μια μοναδική ομάδα. Η μέθοδος αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι ο αριθμός των λύσεων να μην μπορεί να μειωθεί περαιτέρω.

Συχνά εμφανίζεται πρόβλημα όταν εφαρμόζοντας τον παραπάνω αλγόριθμο μετά από έναν αριθμό επαναλήψεων, ο αριθμός των σταθμών βάσης δε μπορεί να μειωθεί περαιτέρω επειδή οι βέλτιστες λύσεις είναι όλες ίδιες. Η βέλτιστη λύση εξαρτάται από τον τελικό αριθμό των σταθμών βάσης. Σε αυτή τη περίπτωση επιλέγεται μία από τις βέλτιστες λύσεις τυχαία.

### 3.3 Άπληστος αλγόριθμος

Ο αλγόριθμος CAT μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε συνεργασία με τον Άπληστο Αλγόριθμο GR (Greedy Algorithm) για βελτιστοποίηση της τελικής λύσης. Η βασική ιδέα του GR αλγορίθμου είναι ότι, δεδομένου ενός αριθμού σταθμών βάσης και σημείων ελέγχου, ο αλγόριθμος αρχικά επιλέγει το σταθμό βάσης που καλύπτει τα περισσότερα σημεία ελέγχου. Αμέσως μετά ο σταθμός βάσης και τα σημεία ελέγχου αφαιρούνται από την περιοχή μελέτης και η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται ωσότου να μην υπάρχουν εναπομείναντα σημεία ελέγχου προς κάλυψη.

Η ταχύτητα του GR αλγορίθμου είναι προφανώς συνάρτηση του αριθμού των πιθανών σταθμών βάσης, που έχουν τοποθετηθεί αρχικά στην περιοχή μελέτης. Γενικά, ο χρόνος εκτέλεσης του GR αλγορίθμου είναι μικρότερος από εκείνον που απαιτείται για τον CAT αλγόριθμο. Στην εργασία αυτή ο GR αλγόριθμος εφαρμόζεται στην τελική λύση του αλγορίθμου CAT, με σκοπό τη μείωση ακόμα περισσότερο του αριθμού των σταθμών βάσης που απαιτούνται για να καλύψουν μια περιοχή. Αυτό έγινε επειδή, στη λύση που δίνει ο CAT αλγόριθμος, κάποιο σημείο ελέγχου μπορεί να

καλύπτεται από περισσότερους από ένα σταθμό βάσης. Επομένως, για μεγαλύτερη βελτιστοποίηση της τελικής λύσης του CAT θα πρέπει κάθε σημείο ελέγχου να καλύπτεται από ένα σταθμό βάσης.

## 4 Εφαρμογή αλγορίθμων στο GSM-R δίκτυο

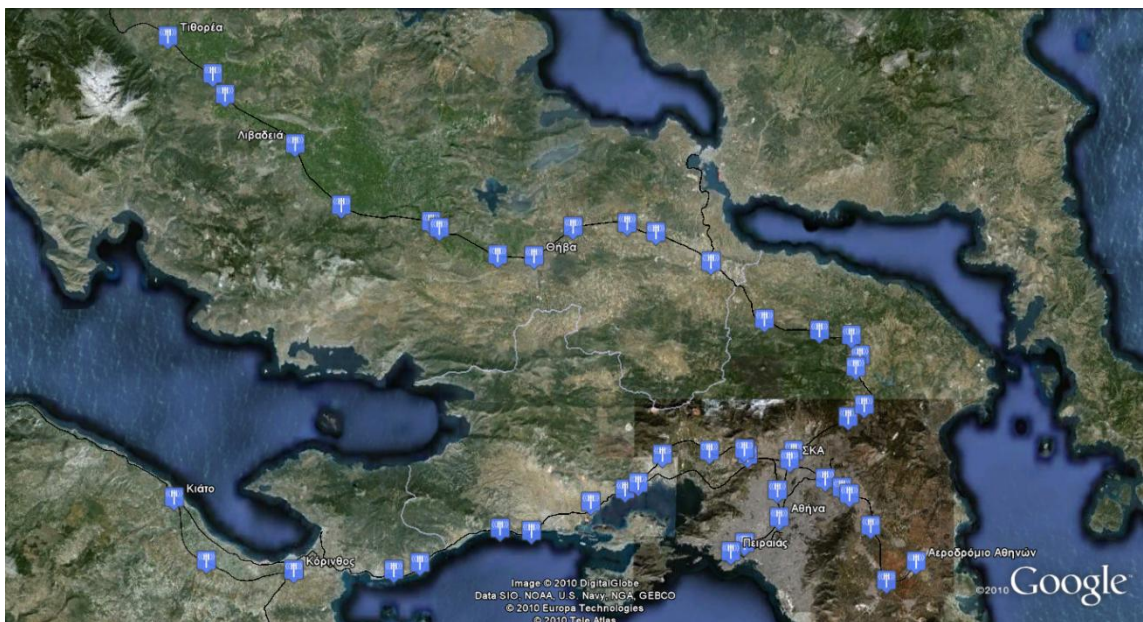
### 4.1 Πιθανές θέσεις σταθμών βάσης

Οι θέσεις των σταθμών βάσης επιλέγονται ώστε να βρίσκονται εντός των ορίων ιδιοκτησίας του Οργανισμού Σιδηροδρόμων Ελλάδας. Επομένως, οι σταθμοί βάσης τοποθετούνται κατά προτεραιότητα σε σιδηροδρομικούς σταθμούς, σε κατάλληλες θέσεις για την ραδιοκάλυψη των σηράγγων και σε επιλεγμένες θέσεις σε όλο το μήκος του βασικού σιδηροδρομικού άξονα ΠΑΘΕΠ. Επίσης, τοποθετούνται με σκοπό να προσφέρουν κάλυψη σε σημεία στα οποία υπάρχει αυξημένη κίνηση, όπως είναι: οι επιβατικοί σταθμοί, οι εμπορευματικοί σταθμοί και τα αμαξοστάσια.

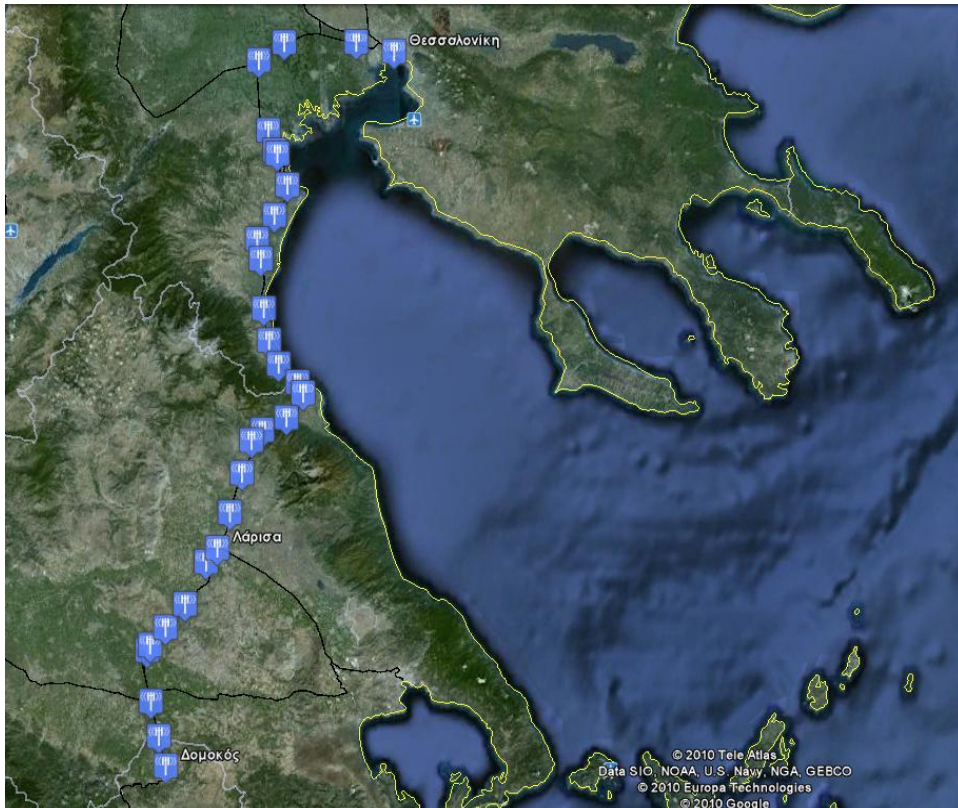
Με βάση τις παραπάνω προϋποθέσεις ορίζονται οι πιθανές θέσεις των σταθμών βάσης κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής. Δεδομένου ότι η σιδηροδρομική υποδομή του βασικού άξονα Πάτρα – Αθήνα – Θεσσαλονίκη – Ειδομένη – Προμαχώνας βρίσκεται σε ανακατασκευή σε ορισμένα τμήματα, που σημαίνει ότι θα ακολουθήσει νέα χάραξη, οι περιοχές που θα εξεταστούν είναι:

- [1] Κιάτο – Σιδηροδρομικό Κέντρο Αχαρνών (ΣΚΑ) – Αεροδρόμιο Αθηνών
- [2] Πειραιάς – Σταθμός Αθηνών – Τιθορέα
- [3] Δομοκός – Λάρισα – Θεσσαλονίκη
- [4] Θεσσαλονίκη – Προμαχώνας

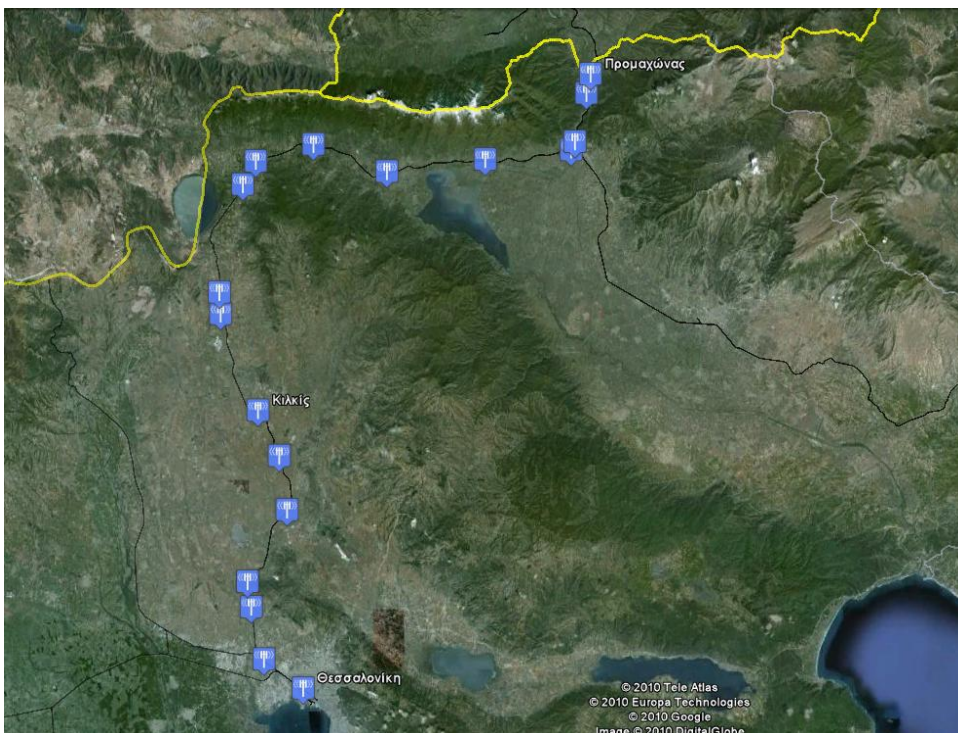
Στα παρακάτω σχήματα και με τη βοήθεια της εφαρμογής Google Maps, φαίνονται οι τέσσερις περιοχές και οι πιθανές θέσεις σταθμών βάσης κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής. Οι συντεταγμένες των θέσεων αυτών εισάγονται στους αλγόριθμους με τη μορφή γεωγραφικού μήκους και πλάτους στο Matlab R2009b.



Σχήμα 4.1: Πιθανές θέσεις σταθμών βάσης περιοχής [1] & [2]



**Σχήμα 4.2: Πιθανές θέσεις σταθμών βάσης περιοχής [3]**



**Σχήμα 4.3: Πιθανές θέσεις σταθμών βάσης περιοχής [4]**

Για κάθε ένα σταθμό βάσης, εισάγονται επιπλέον δεδομένα όπως η ισχύς ακτινοβολίας στην έξοδο της κεραίας του (EIRP), η χωρητικότητα με βάση τη

διαστασιοποίηση του και ο ελεγκτής σταθμών βάσης (BSC) στον οποίο είναι συνδεδεμένος (Παράρτημα Π.2). Όπως αναφέρθηκε, οι σταθμοί βάσης θα μπορούν να συνδέονται εναλλάξ σε διαφορετικό Ελεγκτή Σταθμών Βάσης BSC (interleaved BSCs) για λόγους ασφαλείας (redundancy).

#### 4.2 Σημεία ελέγχου

Μια περιοχή ραδιοκάλυψης αναπαριστάται από έναν αριθμό σημείων ελέγχου CN (control nodes). Τα σημεία ελέγχου επιλέγονται ώστε να αντιπροσωπεύουν όλες τις τοποθεσίες όπου η κάλυψη είναι απαραίτητη. Για ένα δίκτυο GSM-R, τα σημεία ελέγχου τοποθετούνται στους επιβατικούς σταθμούς, στους εμπορευματικούς σταθμούς, στα αμαξοστάσια, στο κέντρο μιας σήραγγας και διαδοχικά ανά 2-3 χμ. κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής. Ο μέγιστος αριθμός των επιτρεπόμενων σημείων ελέγχου είναι απεριόριστος.

Για κάθε σημείο ελέγχου ορίζεται ένα μοντέλο διάδοσης ανάλογα με το αν βρίσκεται σε αστικό, μη αστικό περιβάλλον ή εντός μιας σήραγγας. Στη τελευταία περίπτωση, αν το σημείο ελέγχου βρίσκεται εντός σήραγγας τότε εισάγεται και το συνολικό μήκος της σήραγγας για τον υπολογισμό των απωλειών διάδοσης εντός της σήραγγας. Επιπλέον, για κάθε σημείο ελέγχου προσδιορίζεται η πιθανή κίνηση σε erlang από κάθε είδος πηγής κίνησης, φωνή ή δεδομένα (Παράρτημα Π.3). Με βάση την ανάλυση της χωρητικότητας του GSM-R δικτύου, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.5, η συνολική κίνηση ανά χρήστη και ανά ώρα αιχμής αντίστοιχα για κάθε είδος χρήστη είναι:

- Συνολική κίνηση χρήστη - τρένο: 0.26 erlang
- Συνολική κίνηση χρήστη - προσωπικό: 0.14 erlang

	Κατά μήκος σιδ. γραμμής	Εντός σήραγγας	Μικρός σταθμός	Μεγάλος σταθμός
<b>Αριθμός χρηστών - τρένο</b>	2	2	3	10
<b>Αριθμός χρηστών - προσωπικό</b>	10	10	15	30
<b>Συνολική κίνηση (erl)</b>	1,92	1,92	2,88	6,80

**Σχήμα 4.4: Κίνηση στα σημεία ελέγχου**

Επομένως, εκτιμώντας τον αριθμό των χρηστών για κάθε θέση των σημείων ελέγχου (κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής, εντός σήραγγας, σε μικρό σιδηροδρομικό σταθμό, σε μεγάλο σιδηροδρομικό σταθμό) καθορίζεται η πιθανή κίνηση στο σημείο αυτό. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, σε ένα μικρό σιδηροδρομικό σταθμό, θεωρήθηκε ότι το δίκτυο μπορεί να εξυπηρετήσει

συγχρόνως 3 τρέινα και 15 χρήστες προσωπικού. Αυτό σημαίνει ότι η συνολική κίνηση στο σημείο ελέγχου θα είναι 2.88 erlang.

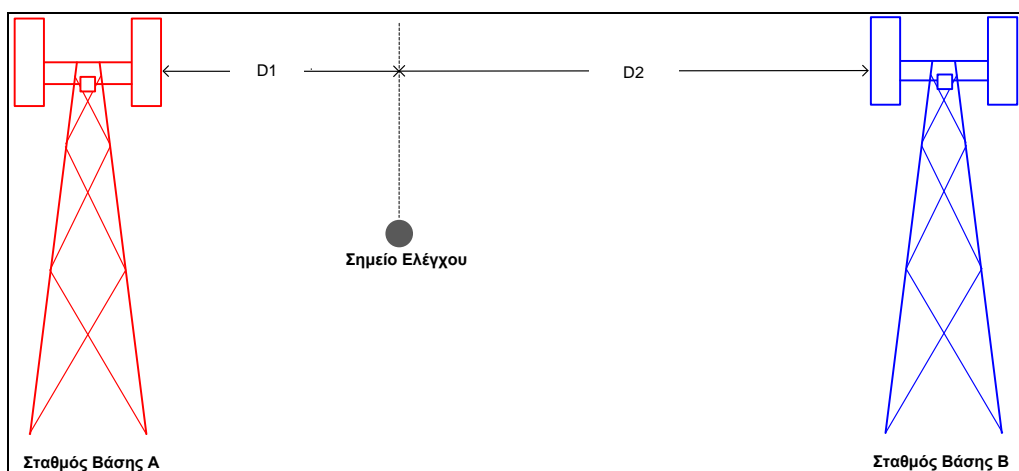
#### 4.3 Υπολογισμός ραδιοκάλυψης

Για μια περιοχή του σιδηροδρομικού δικτύου, γνωρίζοντας τους σταθμούς βάσης και τα σημεία ελέγχου, υπολογίζεται η GSM-R ραδιοκάλυψη. Ο αλγόριθμος από κάθε ένα σταθμό βάσης και για κάθε ένα σημείο ελέγχου υπολογίζει τις απώλειες διάδοσης στο χώρο με βάση το μοντέλο διάδοσης (Παράρτημα Π.4). Έτσι, εξάγεται ένας πίνακας με την τιμή ισχύος σε κάθε σημείο ελέγχου για κάθε σταθμό βάσης. Αν οι απώλειες διάδοσης από ένα σταθμό βάσης είναι τόσες ώστε η ισχύς στο σημείο ελέγχου να μην πέφτει κάτω από το κατώφλι ισχύος -84 dB, τότε υπάρχει κάλυψη στο σημείο αυτό από το συγκεκριμένο σταθμό βάσης. Η απόσταση μεταξύ σταθμού βάσης και σημείου ελέγχου, που έχουν συντεταγμένες σε γεωγραφικό μήκος και πλάτος, υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τον haversine τύπο (Παράρτημα Π.5). Για όλους τους υπολογισμούς της ραδιοκάλυψης, θεωρούμε ότι κάθε σταθμός βάσης έχει ομοιοκατευθυντική εκπομπή.

Για τα μοντέλα εξωτερικού χώρου (urban, open), όπως περιγράφηκαν στην παράγραφο 2.4, οι απώλειες διάδοσης υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$PL(dB) = - (A + B \log (D)) + X_s$$

Στην αρχή της εκτέλεσης του προγράμματος προσομοίωσης (Παράρτημα Π.1), ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει αν θέλει να συνυπολογιστούν οι απώλειες σκίασης  $X_s$  ή όχι.

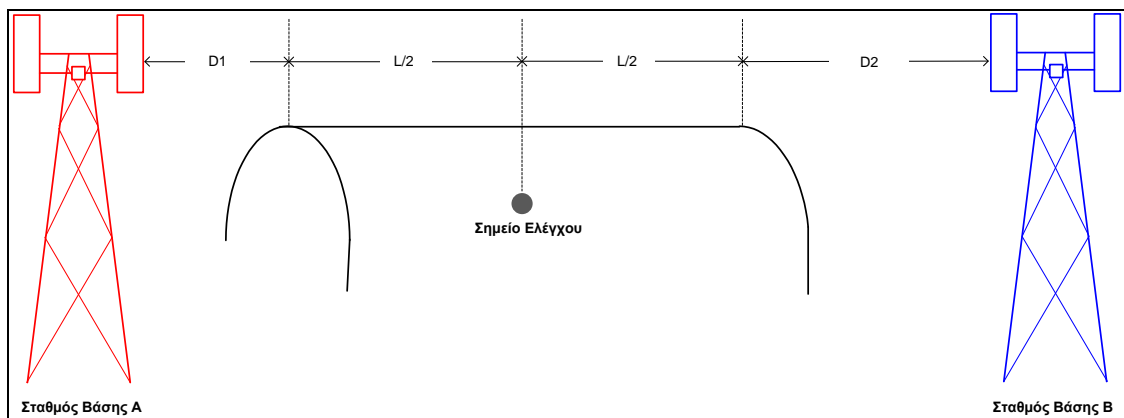


Σχήμα 4.5: Σημείο ελέγχου κατά μήκος σιδηροδρομικής γραμμής



Για τον υπολογισμό των απωλειών διάδοσης σε σήραγγα χρησιμοποιείται το εκάστοτε μοντέλο διάδοσης εξωτερικού χώρου έως την είσοδο της σήραγγας και από την είσοδο της σήραγγας έως το κέντρο της σήραγγας, που τοποθετείται το σημείο ελέγχου, υπολογίζονται οι επιπλέον απώλειες βάσει της εξίσωσης απωλειών ελεύθερου χώρου προσαυξημένες από απώλειες 10 dB λόγω διακύμανσης του σήματος και από απώλειες 10 dB από στροφές στη σήραγγα και άλλα εμπόδια.

$$PL(\text{dB}) = - (A + B \log (D)) + 20 \log \left( \frac{4\pi(L/2)}{\lambda} \right) + 20$$



Σχήμα 4.6: Σημείο ελέγχου στο κέντρο σήραγγας

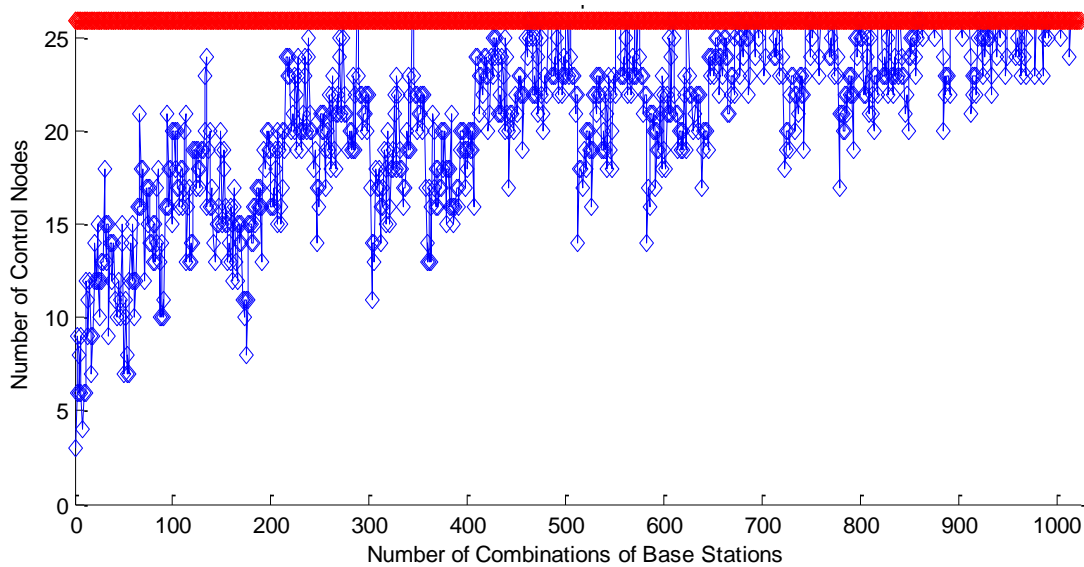
#### 4.4 Εφαρμογή συνδυαστικού αλγορίθμου CAT

Ο συνδυαστικός αλγόριθμος βασίζεται στην ιδέα του συνδυασμού των πιθανών θέσεων των σταθμών βάσεων BS. Ο αλγόριθμος εκτελείται ώστε να βρει τον ελάχιστο αριθμό από σταθμούς βάσης που καλύπτουν τις τέσσερις περιοχές κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής. Ο βασικός σιδηροδρομικός άξονας χωρίστηκε σε περιοχές για την καλύτερη απόδοση του αλγορίθμου, δεδομένου ότι οι περιοχές αυτές είναι διακριτές επομένως μειώνονται οι συνδυασμοί και κατ' επέκταση και ο υπολογιστικός χρόνος του αλγορίθμου.

Ο υπολογιστικός χρόνος του αλγορίθμου, δηλαδή ο αριθμός των συνδυασμών αυξάνεται δραματικά με την αύξηση του αριθμού των πιθανών σταθμών βάσης. Η φύση του προβλήματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Στον οριζόντιο άξονα είναι ο αριθμός των συνδυασμών σταθμών βάσης και στον κατακόρυφο άξονα ο αριθμός των σημείων ελέγχου που καλύπτονται ανάλογα με το συνδυασμό. Κάθε μπλε ρόμβος αντιπροσωπεύει έναν συνδυασμό.

Εξετάζοντας μια μικρή περιοχή με 10 σταθμούς βάσης και 26 σημεία ελέγχου και αφού υπολογιστεί η κάλυψη που παρέχουν όλοι οι συνδυασμοί σταθμών βάσης σε όλα τα σημεία ελέγχου, παρατηρείται ότι όσο αυξάνονται οι συνδυασμοί, η

καμπύλη συγκλίνει στο βέλτιστο, δηλαδή την πλήρη κάλυψη όλων των σημείων ελέγχου (Παράρτημα Π.6). Ωστόσο, δεν είναι απαραίτητο να βρεθεί η βέλτιστη λύση υπολογίζοντας μεγάλο αριθμό συνδυασμών. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, ένας συνδυασμός 8 σταθμών βάσης (περίπου 290 συνδυασμοί) καλύπτει όλα τα σημεία ελέγχου, που σημαίνει ότι δε χρειάζονται και οι 10 σταθμοί βάσης για την πλήρη κάλυψη της περιοχής.

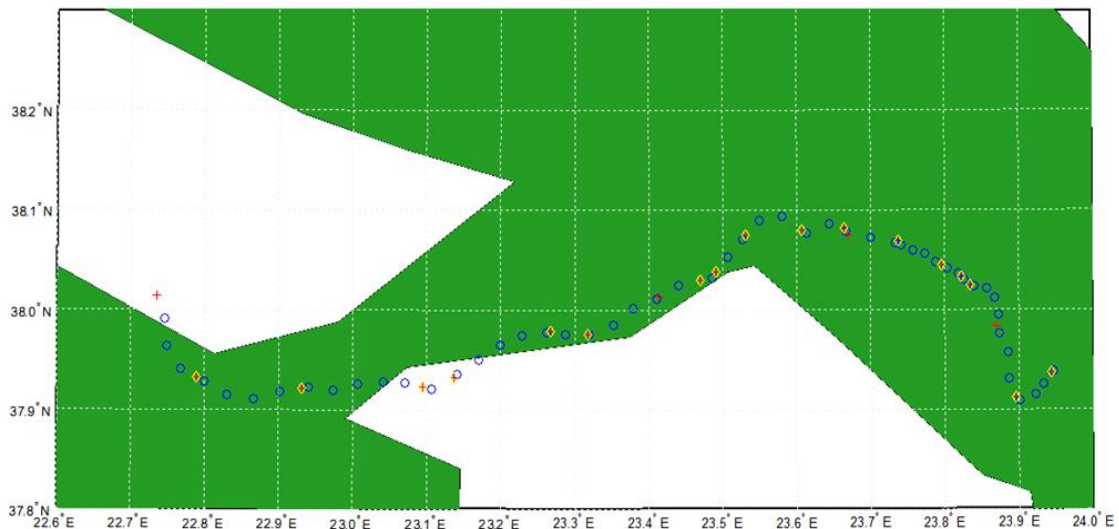


**Σχήμα 4.7: Αριθμός από CN καλυπτόμενα από BS συνδυασμούς**

Ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου μπορεί να μειωθεί με την εφαρμογή του CAT αλγορίθμου (Παράρτημα Π.7). Ο CAT χρησιμοποιεί τη λογική του συνδυαστικού αλγορίθμου (Παράρτημα Π.8), χωρίζοντας επιπλέον το σύνολο των σταθμών βάσης μιας περιοχής σε έναν αριθμό από ομάδες από λιγότερους σταθμούς βάσης. Ο αριθμός των ομάδων καθορίζεται από τον χρήστη πριν την εκτέλεση του αλγορίθμου. Οι σταθμοί βάσης της κάθε ομάδας επιλέγονται τυχαία. Για κάθε ομάδα βρίσκονται πολλαπλές λύσεις. Ο αλγόριθμος επιλέγει τις λύσεις με το μικρότερο κόστος. Συνεπώς, για κάθε ομάδα βρίσκεται ποιος συνδυασμός από σταθμούς βάσης δίνει την καλύτερη κάλυψη. Οι βέλτιστες λύσεις κάθε ομάδας συγχωνεύονται σε μια λύση. Η μέθοδος αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι ο αριθμός των λύσεων να μην μπορεί να μειωθεί περαιτέρω. Σε κάθε επανάληψη δημιουργούνται ομάδες που περιέχουν διαφορετικούς σταθμούς βάσης. Ο αριθμός των επαναλήψεων καθορίζεται από τον χρήστη στη αρχή του προγράμματος.

Όλες οι λύσεις από κάθε επανάληψη αποθηκεύονται και ο αλγόριθμος αναζητεί, μεταξύ των λύσεων, τη βέλτιστη λύση με τον μικρότερο αριθμό από σταθμούς βάσης (Παράρτημα Π.1). Εφαρμόζοντας τον παραπάνω αλγόριθμο μετά από έναν αριθμό επαναλήψεων, ο αριθμός των σταθμών βάσης δε μπορεί να μειωθεί περαιτέρω

επειδή οι βέλτιστες λύσεις είναι όλες ίδιες. Η βέλτιστη λύση εξαρτάται από τον τελικό αριθμό των σταθμών βάσης. Σε αυτή τη περίπτωση επιλέγεται τυχαία μία από τις βέλτιστες λύσεις τυχαία. Ο αλγόριθμος εμφανίζει τη βέλτιστη λύση σε ένα σχήμα μαζί με όλες τις πιθανές θέσεις των σταθμών βάσης και τα σημεία ελέγχου, ώστε να φαίνεται η βελτιστοποίηση.



Σχήμα 4.8: Λύση CAT αλγορίθμου

Στο σχήμα 4.8 παρατηρούμε μια βέλτιστη λύση του CAT αλγορίθμου για τη περιοχή Κιάτο – ΣΚΑ – Αεροδρόμιο. Με μπλε κύκλο αναπαρίστανται τα σημεία ελέγχου, με κόκκινο σταυρό όλες οι πιθανές θέσεις σταθμών βάσης και με κίτρινο ρόμβο αναπαριστάται η λύση του CAT αλγορίθμου.

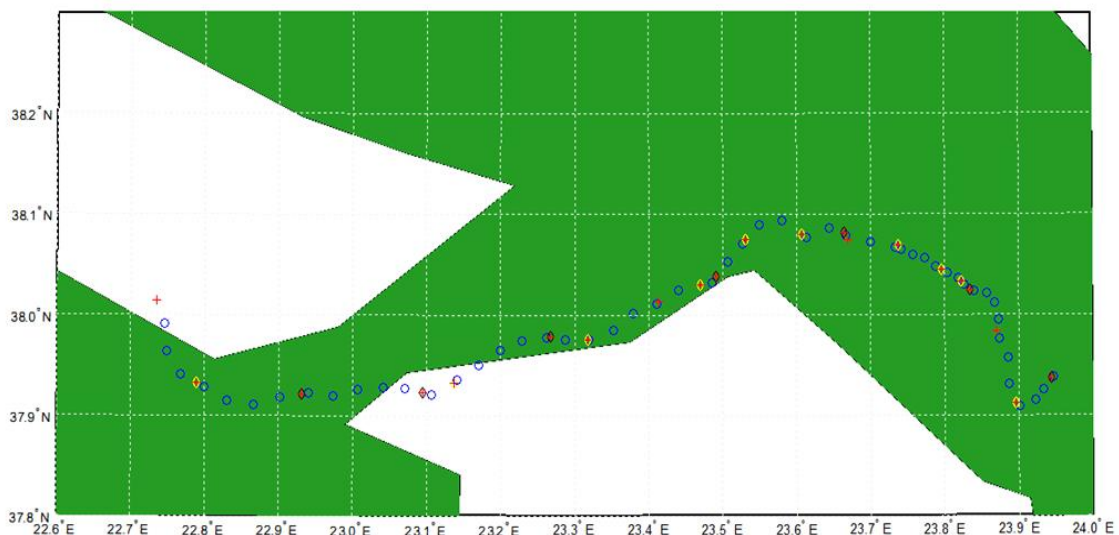
Ο αλγόριθμος CAT έχει τη δυνατότητα να συνυπολογίζει και το μοντέλο χωρητικότητας της περιοχής. Αυτή την επιλογή έχει ο χρήστης στην αρχή της εκτέλεσης του αλγορίθμου. Το μοντέλο χωρητικότητας θεωρεί ότι η κίνηση είναι ανομοιογενής στη περιοχή κάλυψης. Για κάθε σημείο ελέγχου έχουν οριστεί οι απαιτήσεις κίνησης. Το άθροισμα της κίνησης κάθε σημείου ελέγχου δίνει τις συνολικές απαιτήσεις για μια περιοχή.

Ο αλγόριθμος CAT χρησιμοποιεί τη φόρμουλα Erlang-B. Η φόρμουλα Erlang-B συσχετίζει την μέση κατάληψη καναλιών (σε erlangs), τον αριθμό των καναλιών και την πιθανότητα απόρριψης κλήσης (GoS), υπό την προϋπόθεση ότι η αποκατάσταση κλήσεων και η διάρκεια των κλήσεων ακολουθούν την κατανομή Poisson. Εισάγοντας την κίνηση κάθε περιοχής και την επιθυμητή πιθανότητα απόρριψης κλήσης στον CAT αλγόριθμο μπορεί να υπολογιστεί ο αριθμός των καναλιών που απαιτούνται για κάθε σταθμό βάσης και κατ'επέκταση ο αριθμός των σταθμών βάσης της περιοχής. Επομένως, οι απαιτούμενοι σταθμοί βάσης σε κάθε περιοχή εξαρτώνται από τις συνολικές απαιτήσεις κίνησης της περιοχής. Ο αλγόριθμος CAT απορρίπτει κάθε λύση

που δεν καλύπτει τις απαιτήσεις κίνησης και από τις υπόλοιπες βρίσκει τη βέλτιστη λύση με βάση τον τελικό αριθμό των σταθμών βάσης.

#### 4.5 Εφαρμογή άπληστου αλγορίθμου Greedy

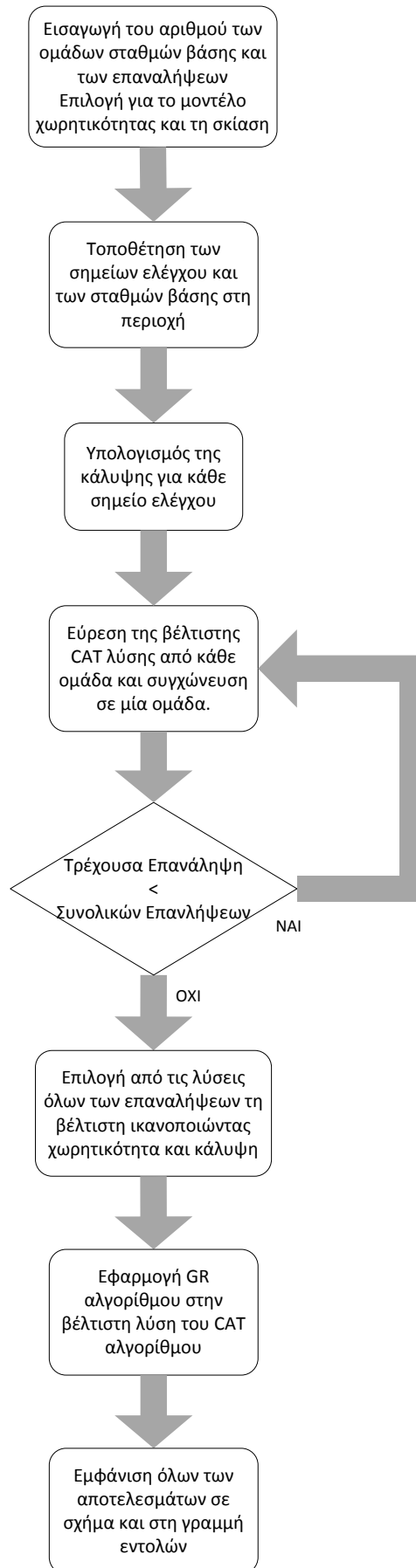
Στη τελική λύση του αλγορίθμου CAT μπορεί να εφαρμοστεί ο Άπληστος Αλγόριθμος GR (Greedy Algorithm) ώστε να μειωθεί περισσότερο ο αριθμός των σταθμών βάσης για την πλήρη κάλυψη μιας περιοχής. Ο GR αλγόριθμος αρχικά επιλέγει το σταθμό βάσης που καλύπτει τα περισσότερα σημεία ελέγχου. Αμέσως μετά ο σταθμός βάσης και τα σημεία ελέγχου αφαιρούνται από την περιοχή μελέτης και η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται ωστόσο να μην υπάρχουν εναπομείναντα σημεία ελέγχου προς κάλυψη (Παράρτημα Π.9).



Σχήμα 4.9: Λύση GR αλγορίθμου

Στο σχήμα 4.9 παρουσιάζεται η βέλτιστη λύση του GR αλγορίθμου για τη περιοχή Κιάτο - ΣΚΑ - Αεροδρόμιο μαζί με τη λύση του CAT αλγορίθμου, τις πιθανές θέσεις των σταθμών βάσης και τα σημεία ελέγχου, ώστε να φαίνεται η βελτιστοποίηση. Με μπλε κύκλο αναπαρίστανται τα σημεία ελέγχου, με κόκκινο σταυρό όλες οι πιθανές θέσεις σταθμών βάσης, με κίτρινο ρόμβο αναπαριστάται η λύση του CAT αλγορίθμου και με μαύρο ρόμβο αναπαριστάται η λύση του GR αλγορίθμου. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα παρατηρούμε ότι οι αρχικοί σταθμοί βάσης είναι 21, η λύση του CAT αλγορίθμου περιέχει 17 σταθμούς βάσης και η λύση του GR αλγορίθμου περιέχει 7 σταθμούς βάσης.

Στο παρακάτω σχήμα περιγράφεται με τη βοήθεια ενός διαγράμματος ροής ολόκληρο το πρόγραμμα προσομοίωσης.



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα ροής προγράμματος

## 5 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά θα γίνουν δοκιμές για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του αλγορίθμου CAT, όπως ο αριθμός των επαναλήψεων εκτέλεσης του αλγορίθμου και ο αριθμός των ομάδων των σταθμών βάσης για την πρώτη περιοχή Κιάτο – ΣΚΑ – Αεροδρόμιο. Στη συνέχεια θα γίνει ανάλυση των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή των αλγορίθμων σε όλες τις περιοχές και για όλα τα πιθανά σενάρια, λαμβάνοντας υπόψη ή όχι το μοντέλο χωρητικότητας και τις απώλειες σκίασης.

Οι αλγόριθμοι θα εφαρμοστούν στο σύνολο των σταθμών βάσης αλλά και στους μισούς σταθμούς βάσης, ανάλογα σε ποιόν Ελεγκτή Σταθμών Βάσης BSC είναι συνδεδεμένοι. Στόχος είναι να εξάγουμε μία λύση που να καλύπτει και τις τρεις περιπτώσεις λειτουργίας των BSC. Όπως ειπώθηκε στη παράγραφο 2.1, η διάταξη των σταθμών βάσης κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής είναι τέτοια ώστε να παρέχουν διπλή κάλυψη δικτύου (redundancy). Οι σταθμοί βάσης θα συνδέονται εναλλάξ σε διαφορετικό Ελεγκτή Σταθμών Βάσης BSC (interleaved BSCs). Πρέπει να σημειωθεί ότι η κανονική λειτουργία του δικτύου περιλαμβάνει και τα δύο BSC, ενώ όταν ένα από τα δύο BSC τεθεί εκτός λειτουργίας το δίκτυο βρίσκεται σε λειτουργία έκτακτης ανάγκης (emergency). Σε λειτουργία έκτακτης ανάγκης, κρίσιμη είναι η πλήρης ραδιοκάλυψη ακόμα και με λιγότερους σταθμούς βάσης χωρίς να είναι απαραίτητο να καλύπτονται οι απαιτήσεις κίνησης. Επομένως, σε αυτή την περίπτωση ο αλγόριθμος θα εφαρμοστεί χωρίς να ληφθεί υπόψη το μοντέλο χωρητικότητας.

### 5.1 Αριθμός επαναλήψεων αλγορίθμου

Αρχικά πρέπει να προσδιοριστεί ο αριθμός των επαναλήψεων εκτέλεσης του αλγορίθμου CAT. Δεδομένου ότι ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται μέχρι ο αριθμός των σταθμών βάσης να μην μπορεί να μειωθεί περαιτέρω και αφού σε κάθε επανάληψη δημιουργούνται ομάδες τυχαία που περιέχουν διαφορετικούς σταθμούς βάσης, θα πρέπει να βρεθεί ο κατάλληλος αριθμός των επαναλήψεων εκτέλεσης του αλγορίθμου CAT. Ο αλγόριθμος εκτελείται διαδοχικά με διαφορετικής τάξης αριθμό επαναλήψεων 10, 100, 1000, 10000 κλπ, λαμβάνοντας υπόψη ή όχι το μοντέλο χωρητικότητας και τις απώλειες σκίασης. Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του αλγορίθμου για ένα τυπικό σενάριο 10 ομάδων σταθμών βάσης και για την πρώτη περιοχή Κιάτο – ΣΚΑ – Αεροδρόμιο, στην οποία έχουν τοποθετηθεί αρχικά 21 σταθμοί βάσης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στη περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες λόγω σκίασης, η λαμβανόμενη ισχύς σε κάθε σημείο ελέγχου είναι

ουσιαστικά μια τυχαία μεταβλητή που εξαρτάται από τον αριθμό και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των σκεδαστών που συμμετέχουν στη διάδοση, αφού η σκίαση ακολουθεί κανονική (Gaussian) λογαριθμική κατανομή. Λόγω αυτής της τυχειότητας, μπορεί να μην υπάρχει σύγκλιση ως προς τις επαναλήψεις. Αυτή η τυχειότητα παρατηρείται στη δεύτερη περίπτωση "χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με απώλειες σκίασης", παρόλα αυτά υπάρχει σύγκλιση. Από όλα τα αποτελέσματα βγαίνει το συμπέρασμα ότι υπάρχει σύγκλιση για όλες τις περιπτώσεις. Επομένως, η καλύτερη επιλογή είναι ο αλγόριθμος CAT να εκτελείται για 100000 επαναλήψεις για όλες τις περιπτώσεις, αφού με σημαντικά μικρότερο χρόνο υπολογισμού, η λύση είναι πολύ κοντά στη βέλτιστη.

Αριθμός επαναλήψεων	Σταθμοί Βάσης			
	χωρίς μοντέλο χωρητικότητας χωρίς σκίαση	χωρίς μοντέλο χωρητικότητας με σκίαση	με μοντέλο χωρητικότητας χωρίς σκίαση	με μοντέλο χωρητικότητας με σκίαση
10	18	20	19	19
100	16	19	17	19
1000	16	19	17	19
10000	15	17	17	18
100000	15	19	17	18
200000	15	18	17	18
300000	15	18	17	18
400000	15	18	17	18
500000	15	18	17	18
1000000	15	18	17	18
1500000	15	18	17	18
2000000	15	18	17	18

Σχήμα 5.1: Αριθμός επαναλήψεων

## 5.2 Αριθμός ομάδων σταθμών βάσης

Στη συνέχεια εξετάζονται τα αποτελέσματα του αλγορίθμου CAT για διαφορετικό αριθμό ομάδων σταθμών βάσης. Ο αλγόριθμος εκτελείται διαδοχικά για 2, 3, 5, 7, 10, 15 και 21 ομάδες σταθμών βάσης, για 100000 επαναλήψεις λαμβάνοντας υπόψη ή όχι το μοντέλο χωρητικότητας και τις απώλειες σκίασης μέχρι ο αριθμός των σταθμών βάσης να μην μπορεί να μειωθεί περαιτέρω.

Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται στην πρώτη περιοχή Κιάτο – ΣΚΑ – Αεροδρόμιο, όπου έχουν τοποθετηθεί αρχικά 21 σταθμοί βάσης. Ο αλγόριθμος CAT θα μπορούσε να εκτελεστεί και για μία μόνο ομάδα σταθμών βάσης, ελέγχοντας όλους τους

συνδυασμούς των 21 σταθμών βάσης, όπου ουσιαστικά ο αλγόριθμος CAT εκφυλίζεται σε αλγόριθμο OCA. Όμως πρακτικά είναι αδύνατο αφού θα χρειαζόταν πάρα πολύ μεγάλο επεξεργαστικό χρόνο.

Παρατηρούμε ότι εκτελώντας τον αλγόριθμο CAT με 21 ομάδες σταθμών βάσης και για μια περιοχή με 21 σταθμούς βάσης, δηλαδή ένας σταθμός βάσης ανά ομάδα, το αποτέλεσμα του αλγορίθμου περιέχει και τους 21 σταθμούς βάσης το οποίο είναι και προφανές. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει καμία χρησιμότητα στην εφαρμογή ενός τέτοιου σεναρίου αφού μόνο από ένα συνδυασμό έχει τη δυνατότητα να επιλέξει ο αλγόριθμος την βέλτιστη λύση.

Αν κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου CAT ληφθεί υπόψη το μοντέλο χωρητικότητας και οι ομάδες των σταθμών βάσης είναι λιγότερες από 7, ο αλγόριθμος συγκλίνει και η βέλτιστη λύση σταθεροποιείται στους 17 σταθμούς βάσης. Αυτό συμβαίνει επειδή οι συνολικές απαιτήσεις κίνησης της περιοχής προϋποθέτουν την ύπαρξη τουλάχιστο ενός συγκεκριμένου αριθμού σταθμών βάσης για την κάλυψή της.

Αριθμός ομάδων σταθμών βάσης	Σταθμοί Βάσης			
	χωρίς μοντέλο χωρητικότητας χωρίς σκίαση	χωρίς μοντέλο χωρητικότητας με σκίαση	με μοντέλο χωρητικότητας χωρίς σκίαση	με μοντέλο χωρητικότητας με σκίαση
2	8	9	17	17
3	9	11	17	17
5	11	14	17	17
7	13	16	17	17
10	14	20	17	18
15	16	17	17	17
21	21	21	21	21

**Σχήμα 5.2: Αριθμός ομάδων σταθμών βάσης**

Τέλος, αν και παρατηρείται ότι κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου χωρίς να συμπεριλαμβάνεται το μοντέλο χωρητικότητας, όσο μειώνεται ο αριθμός των ομάδων σταθμών βάσης τόσο μειώνεται παράλληλα και ο αριθμός των σταθμών βάσης της τελικής λύσης, συγχρόνως αυξάνεται ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Αυτό σημαίνει ότι ενώ η επιλογή των 2 ομάδων σταθμών βάσης δίνει τη βέλτιστη λύση, από την άποψη της υπολογιστικής πολυπλοκότητας καλύτερη επιλογή είναι οι 3 ομάδες, αφού με σημαντικά μικρότερο χρόνο υπολογισμού η λύση είναι πολύ κοντά στη βέλτιστη. Επιπλέον, ο GR αλγόριθμος μπορεί να εφαρμοστεί σε αυτή τη λύση του CAT αλγορίθμου για τη βελτιστοποίησή της, με μικρότερο συνολικό χρόνο



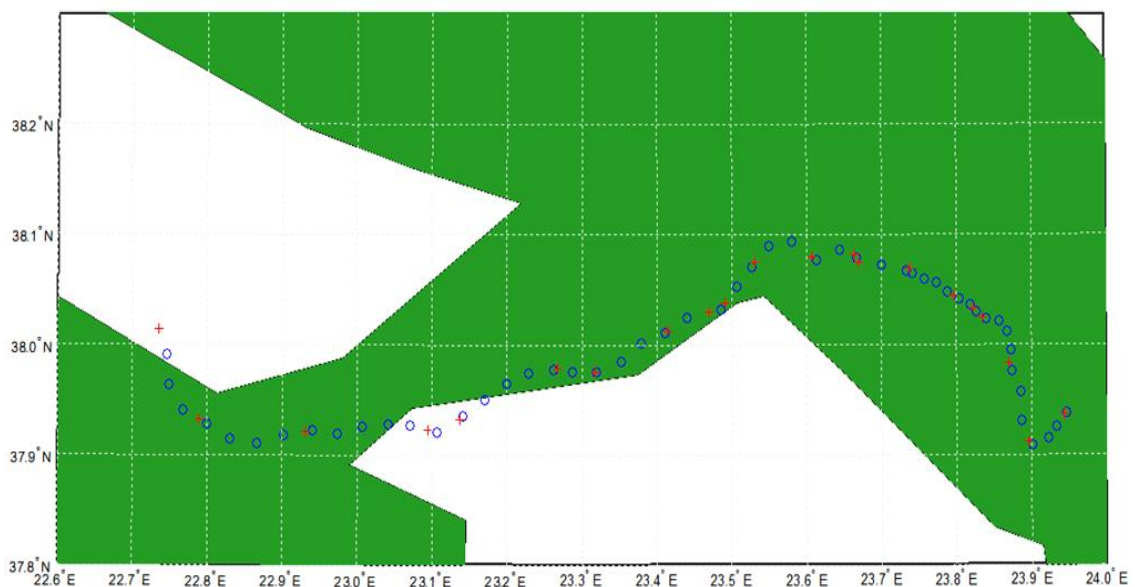
επεξεργασίας. Από την παραπάνω ανάλυση, καταλήγουμε στην επιλογή 3 ομάδων σταθμών βάσης για την εκτέλεση του CAT αλγόριθμου για όλες τις περιπτώσεις.

### 5.3 Εφαρμογή για όλα τα σενάρια

Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή των αλγορίθμων σε όλες τις περιοχές και για όλα τα πιθανά σενάρια. Σημειώνεται ότι, με βάση την ανάλυση των προηγούμενων παραγράφων, για την εκτέλεση του CAT αλγόριθμου επιλέγονται 100000 επαναλήψεις και 3 ομάδες σταθμών βάσης για όλες τις περιοχές του δικτύου και για όλα τα σενάρια.

#### 5.3.1 Κιάτο – Σιδηροδρομικό Κέντρο Αχαρνών – Αεροδρόμιο

Η περιοχή Κιάτο – ΣΚΑ – Αεροδρόμιο περιλαμβάνει συνολικά 21 σταθμούς βάσης και 52 σημεία ελέγχου. Οι σταθμοί βάσης και τα σημεία ελέγχου έχουν τοποθετηθεί κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής από το σιδηροδρομικό σταθμό Κιάτο έως τον τερματικό σταθμό του Αεροδρομίου Αθηνών. Στο παρακάτω σχήμα αναπαρίστανται με τη βοήθεια του Matlab με κόκκινο σταυρό οι σταθμοί βάσης και με μπλε κύκλο τα σημεία ελέγχου. Τόσο οι σταθμοί βάσης όσο και τα σημεία ελέγχου διαγράφουν μία νοητή γραμμή η οποία αναπαριστά την σιδηροδρομική γραμμή.

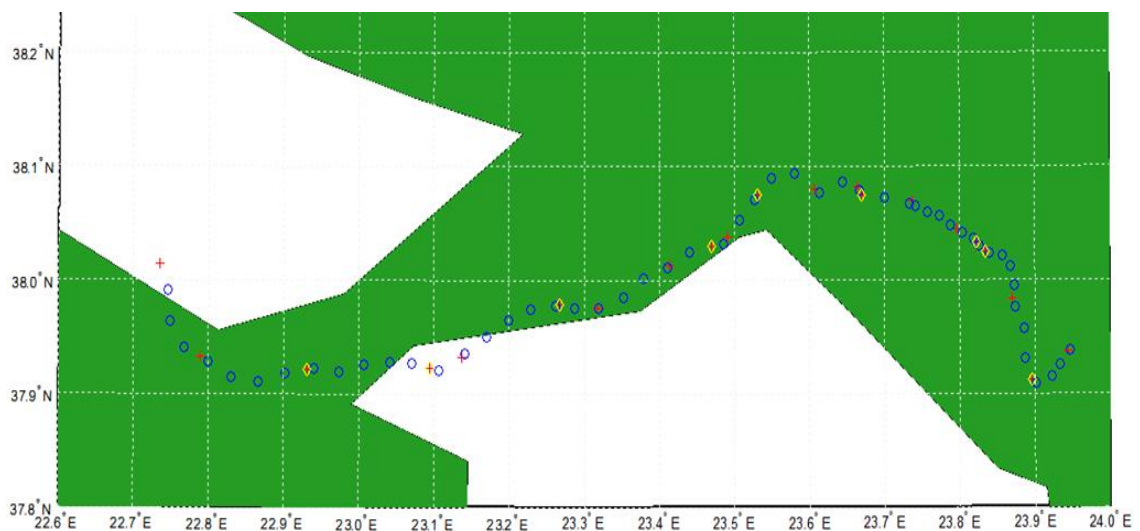


Σχήμα 5.3: Περιοχή Κιάτο – ΣΚΑ – Αεροδρόμιο

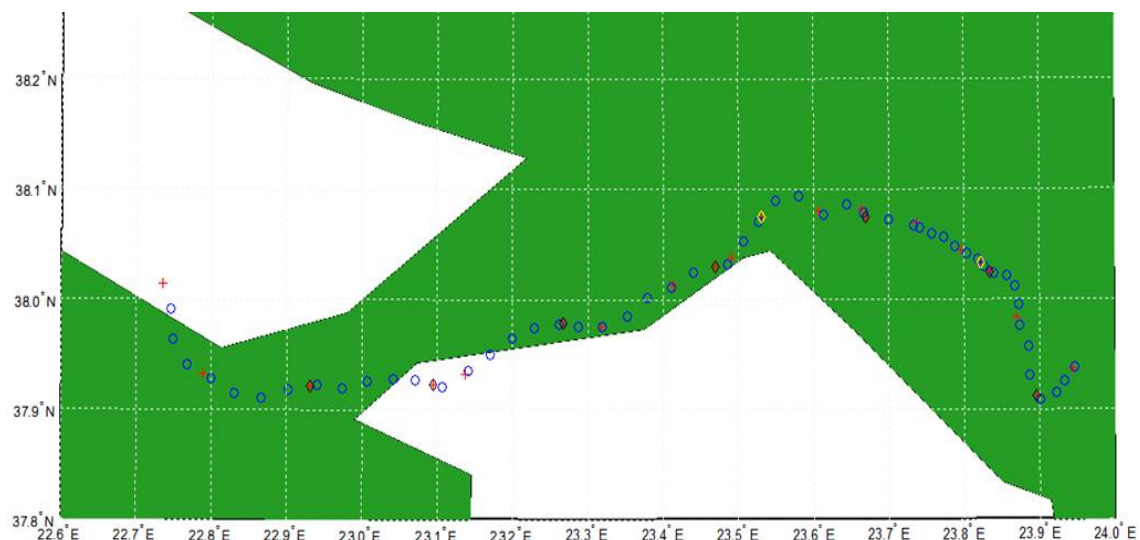
Στη συνέχεια εκτελείται ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT για όλα τα πιθανά σενάρια, για όλους τους σταθμούς βάσης και για τους μισούς σταθμούς βάσης οι οποίοι αντιστοιχούν στα δύο διαφορετικά BSC. Στο τέλος εκτελείται και ο Greedy αλγόριθμος για βελτιστοποίηση της λύσης. Όλα τα αποτελέσματα και οι λύσεις και από τους δύο αλγορίθμους φαίνονται σε αντίστοιχα σχεδιαγράμματα. Με κίτρινο ρόμβο φαίνονται οι σταθμοί βάσης της λύσης του CAT αλγορίθμου, ενώ με μαύρο ρόμβο φαίνονται οι σταθμοί βάσης της λύσης του GR αλγορίθμου.

➤ **21 σταθμοί βάσης, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση.**

Ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT δίνει ως λύση 9 σταθμούς βάσης οι οποίοι μπορούν να καλύψουν την περιοχή (Σχήμα 5.4). Ο αλγόριθμος Greedy δίνει ως λύση 7 σταθμούς βάσης αντίστοιχα (Σχήμα 5.5).



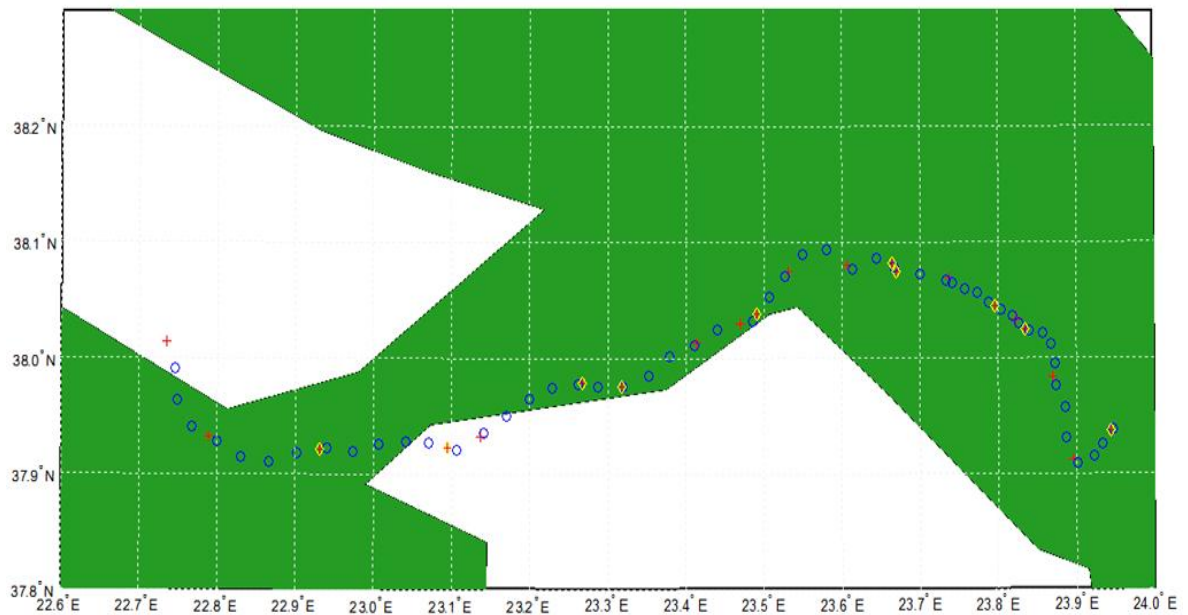
Σχήμα 5.4: CAT - 21 σταθμοί βάσης, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση



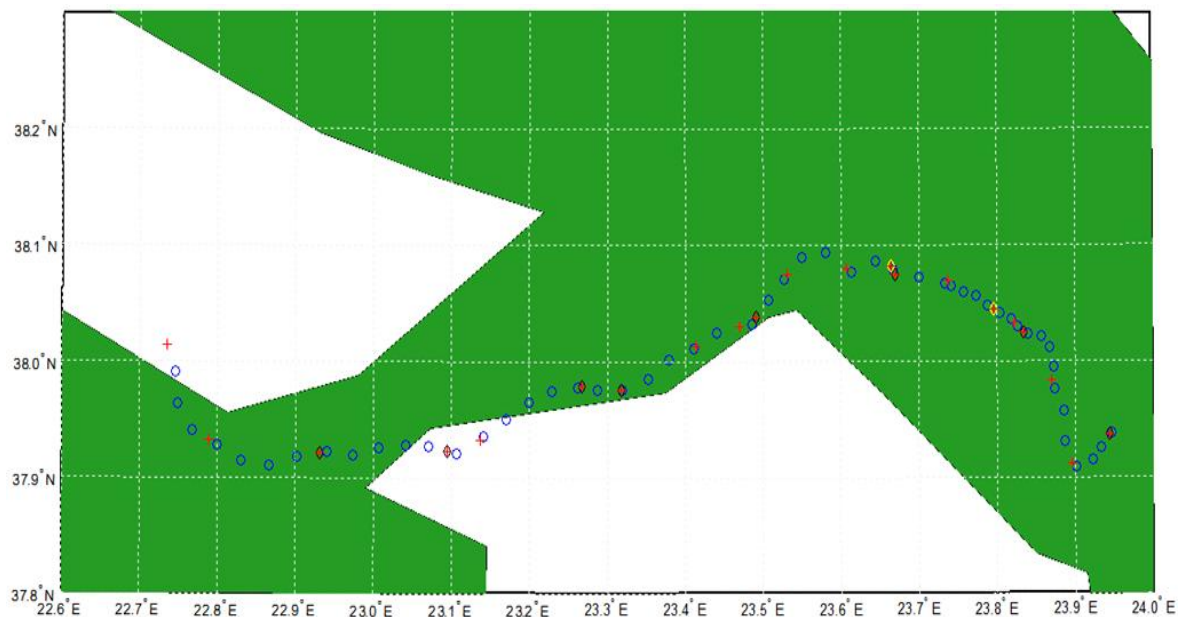
Σχήμα 5.5: GR - 21 σταθμοί βάσης, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση

➤ **21 σταθμοί βάσης, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση.**

Ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT δίνει ως λύση 10 σταθμούς βάσης οι οποίοι μπορούν να καλύψουν την περιοχή. Ο αλγόριθμος Greedy δίνει ως λύση 8 σταθμούς βάσης αντίστοιχα. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι σταθμοί βάσης της λύσης του CAT και GR αλγορίθμου αντίστοιχα. Λόγω των απωλειών σκίασης παρατηρούμε ότι χρειάζονται περισσότεροι σταθμοί βάσης για την πλήρη κάλυψη.



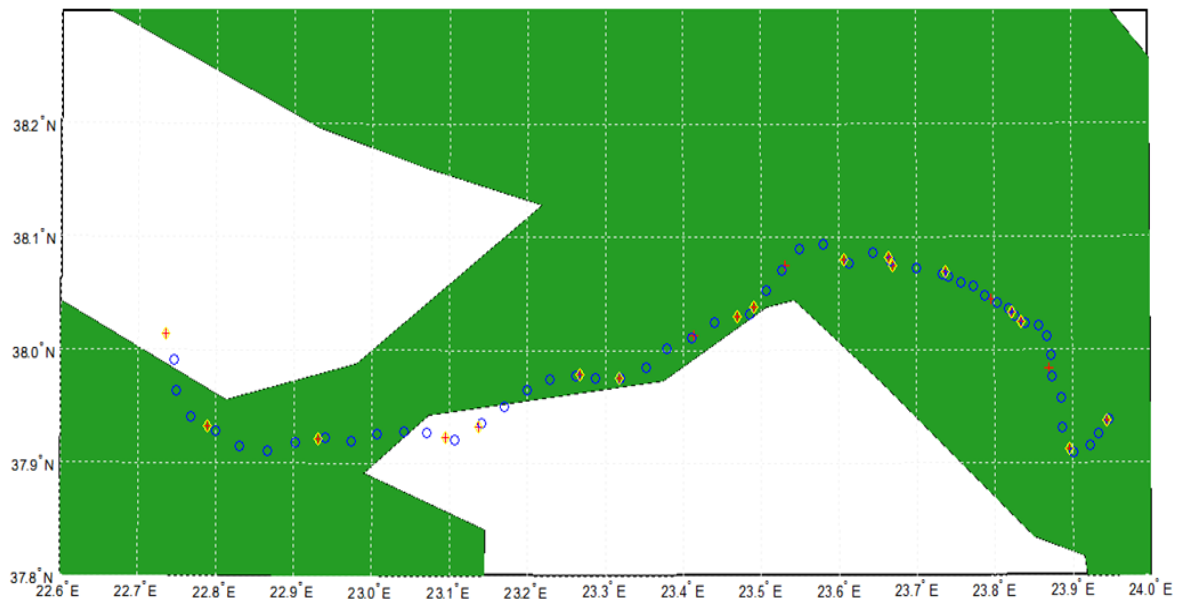
**Σχήμα 5.6: CAT - 21 σταθμοί βάσης, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση**



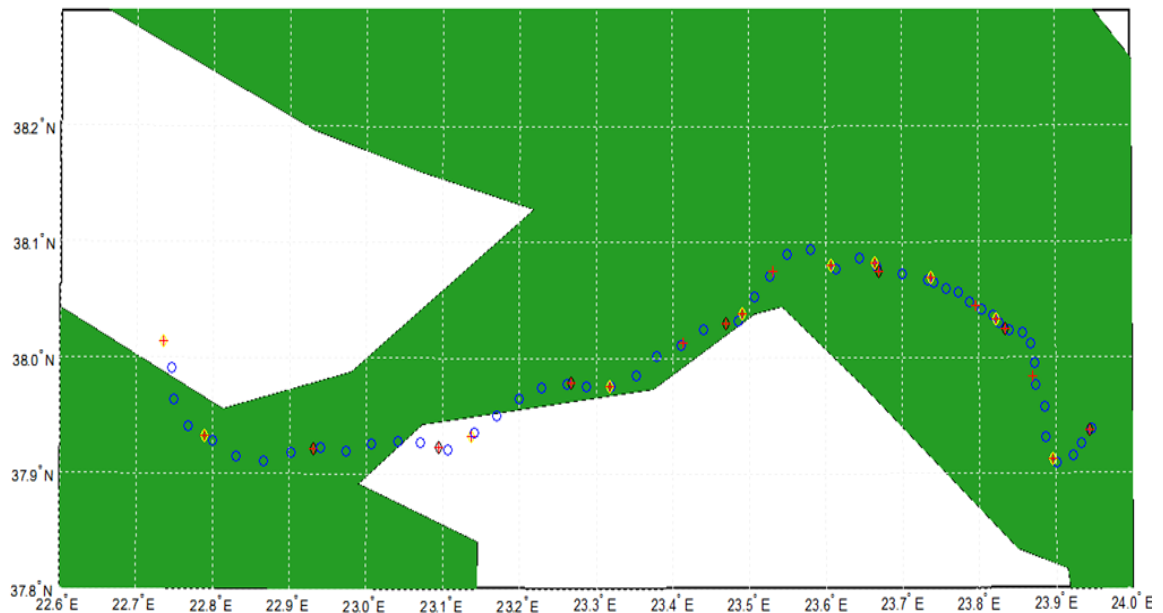
**Σχήμα 5.7: GR - 21 σταθμοί βάσης, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση**

➤ **21 σταθμοί βάσης, με το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση.**

Ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT δίνει ως λύση 17 σταθμούς βάσης οι οποίοι μπορούν να καλύψουν την περιοχή (Σχήμα 5.8). Ο αλγόριθμος Greedy δίνει ως λύση 7 σταθμούς βάσης αντίστοιχα (Σχήμα 5.9). Παρατηρούμε ότι για την κάλυψη της κίνησης της περιοχής χρειάζονται περισσότεροι σταθμοί βάσης για τον CAT από ότι χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το μοντέλο χωρητικότητας.



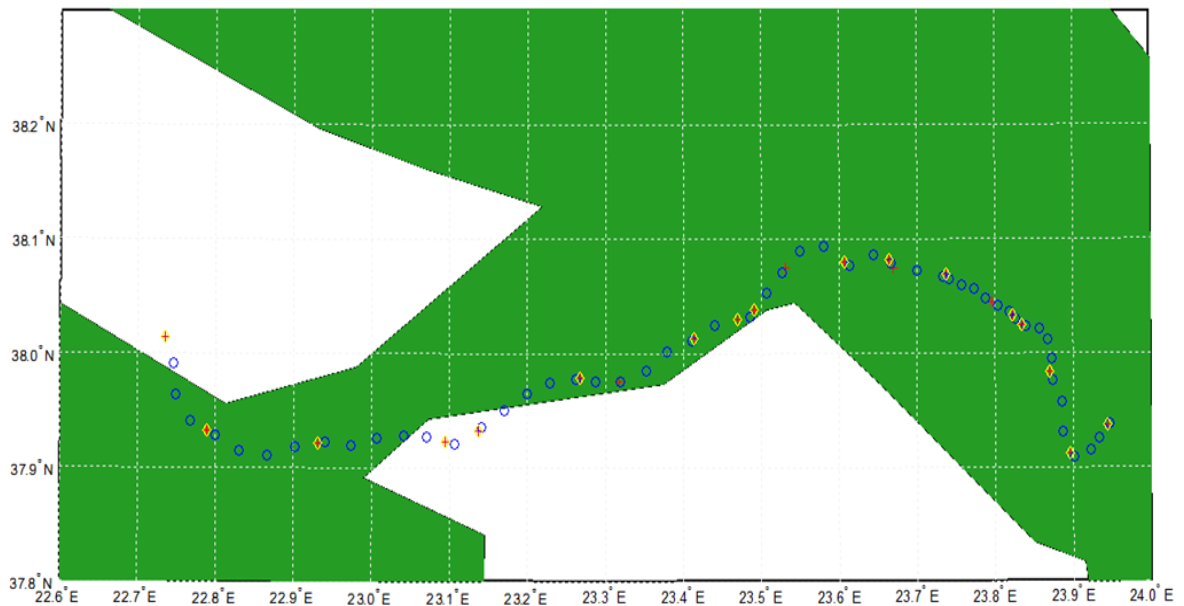
**Σχήμα 5.8: CAT - 21 σταθμοί βάσης, με το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση**



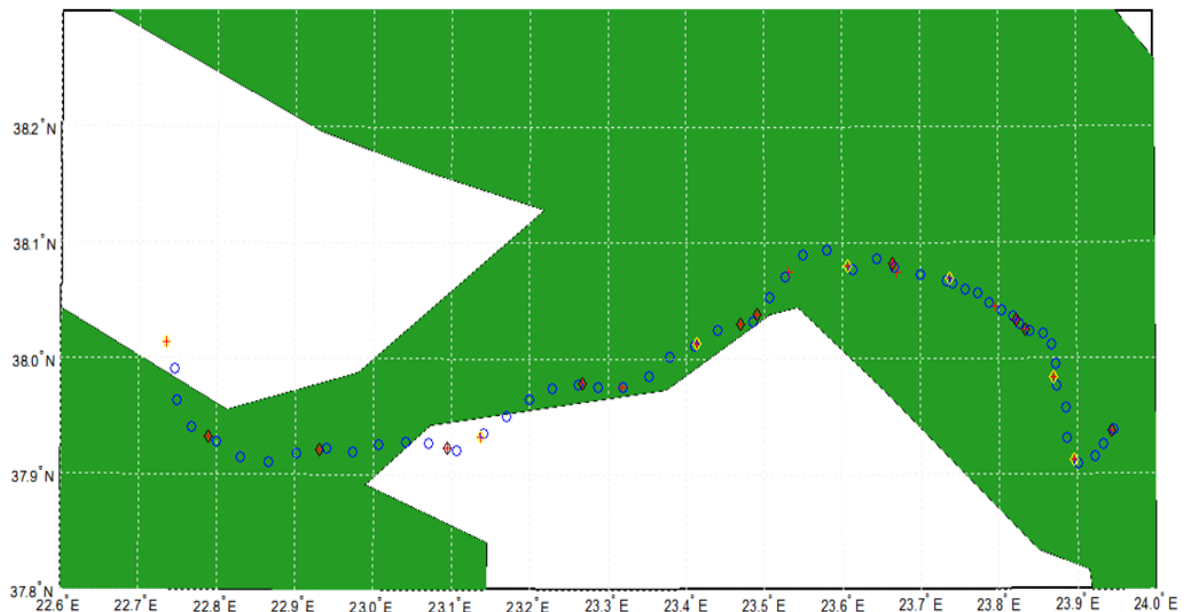
**Σχήμα 5.9: GR - 21 σταθμοί βάσης, με το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση**

➤ **21 σταθμοί βάσης, με το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση.**

Ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT δίνει ως λύση 17 σταθμούς βάσης οι οποίοι μπορούν να καλύψουν την περιοχή (Σχήμα 5.10). Ο αλγόριθμος Greedy δίνει ως λύση 10 σταθμούς βάσης (Σχήμα 5.11). Παρατηρούμε ότι σε αυτή τη περίπτωση για τον CAT αλγόριθμο η λύση ακολουθεί τη λογική της προηγούμενης περίπτωσης. Αυτό σημαίνει ότι η σκίαση δεν παίζει τόσο σημαντικό ρόλο στη βέλτιστη λύση όσο το μοντέλο χωρητικότητας.



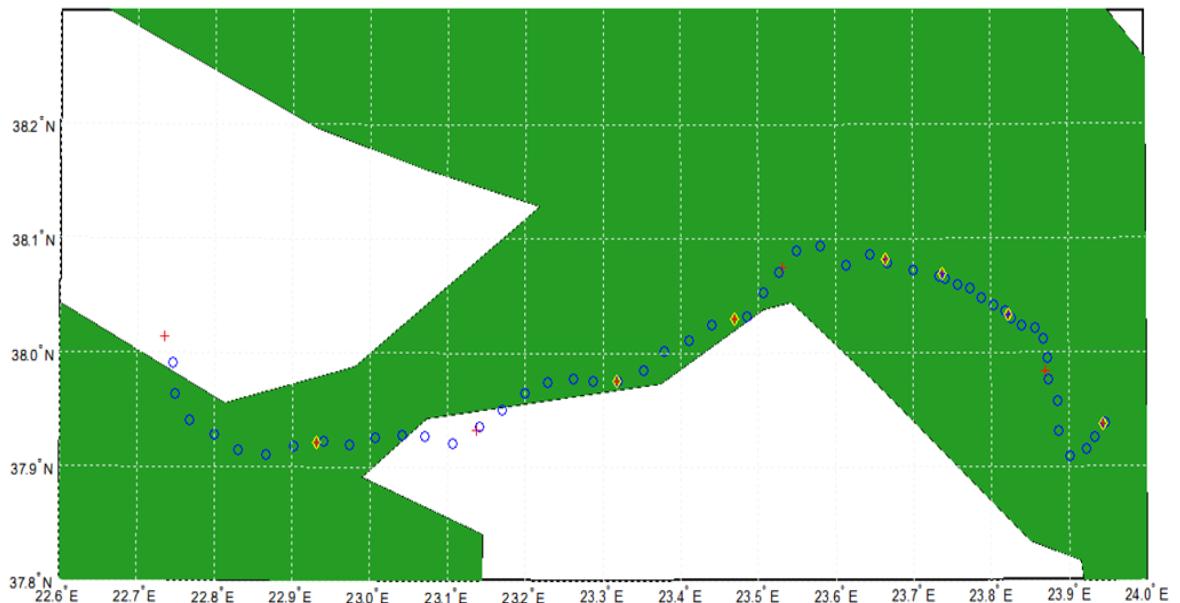
**Σχήμα 5.10: CAT - 21 σταθμοί βάσης, με το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση**



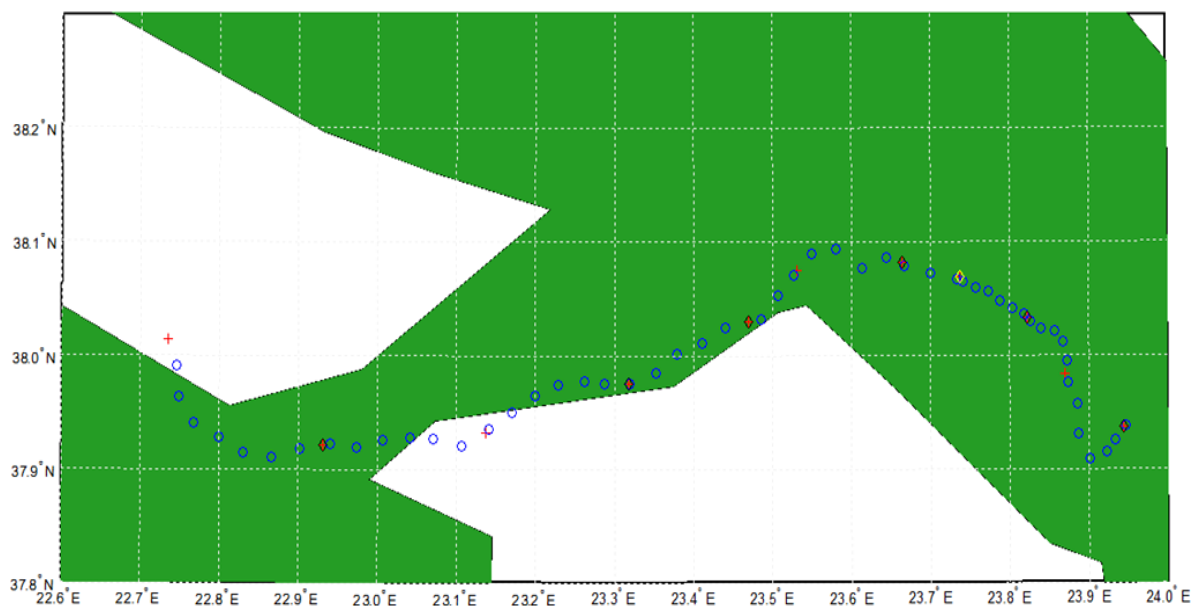
**Σχήμα 5.11: GR - 21 σταθμοί βάσης, με το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση**

➤ **11 σταθμοί βάσης (BSC1), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση.**

Ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT δίνει ως λύση 7 σταθμούς βάσης οι οποίοι μπορούν να καλύψουν την περιοχή (Σχήμα 5.12). Ο αλγόριθμος Greedy δίνει ως λύση 6 σταθμούς βάσης αντίστοιχα (Σχήμα 5.13). Παρατηρείται ότι οι 3 από τους 7 σταθμούς βάσης στον CAT αλγόριθμο και 2 από τους 6 σταθμούς βάσης στον GR αλγόριθμο είναι κοινοί με τη αντίστοιχη λύση όταν συμπεριλαμβάνονται οι σταθμοί βάσης και των δύο BSC.



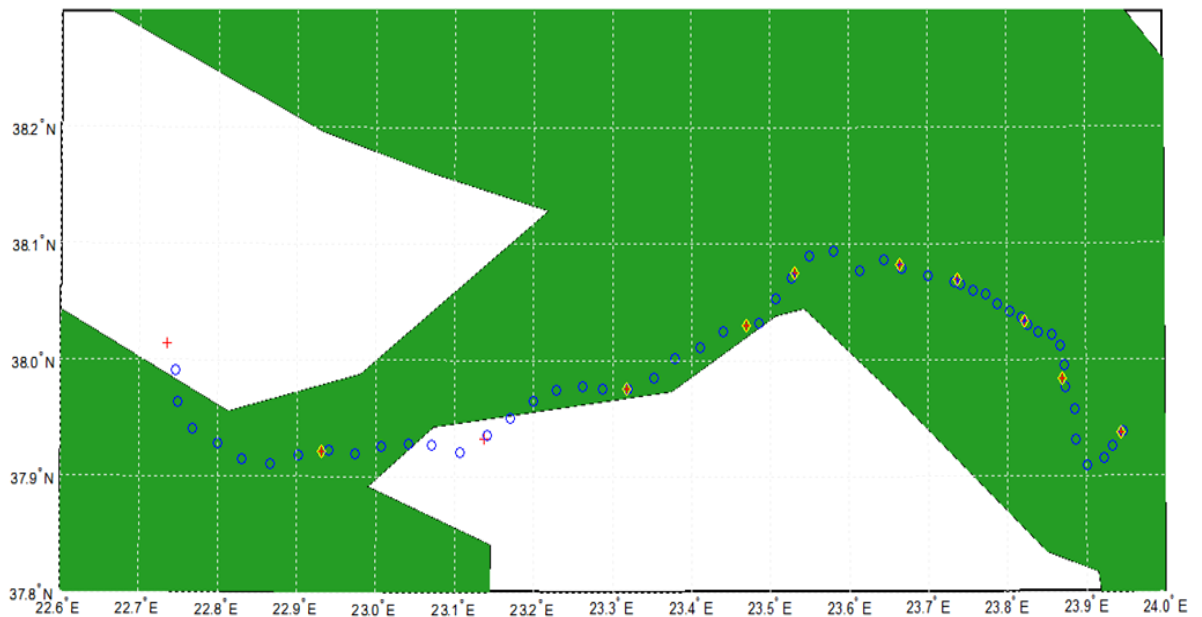
**Σχήμα 5.12: CAT - 11 σταθμοί βάσης (BSC1), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση**



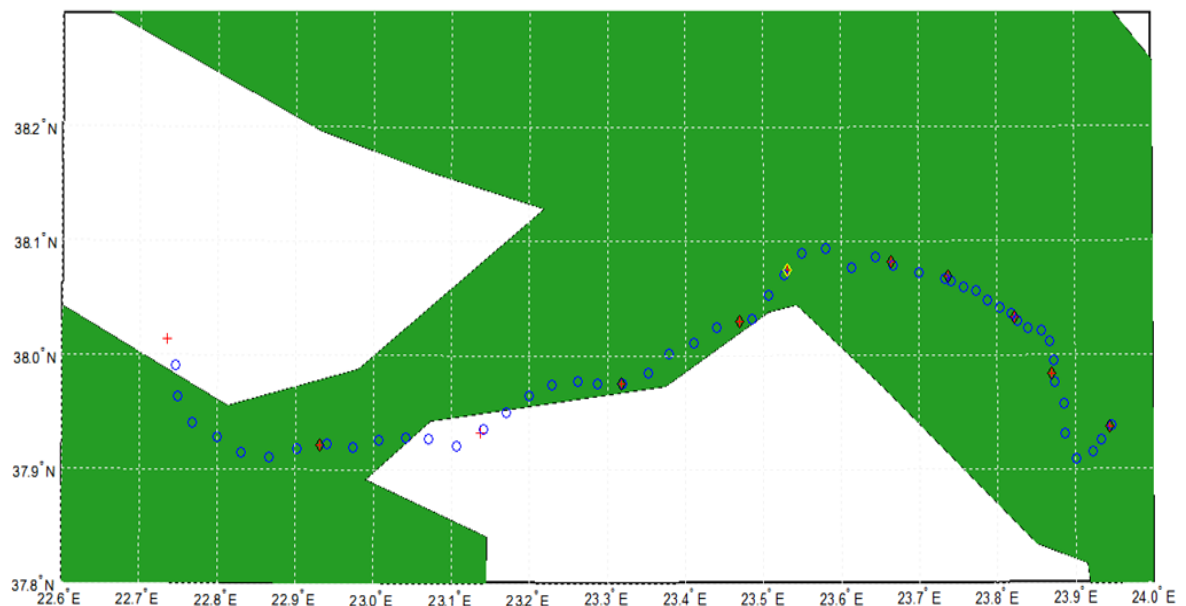
**Σχήμα 5.13: GR - 11 σταθμοί βάσης (BSC1), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση**

➤ **11 σταθμοί βάσης (BSC1), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση.**

Ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT δίνει ως λύση 9 σταθμούς βάσης οι οποίοι μπορούν να καλύψουν την περιοχή (Σχήμα 5.14). Ο αλγόριθμος Greedy δίνει ως λύση 8 σταθμούς βάσης αντίστοιχα (Σχήμα 5.15). Παρατηρείται ότι οι 4 από τους 9 σταθμούς βάσης στον CAT αλγόριθμο και οι 3 από τους 8 σταθμούς βάσης στον GR αλγόριθμο είναι κοινί με τη αντίστοιχη λύση όταν συμπεριλαμβάνονται οι σταθμοί βάσης και των δύο BSC.



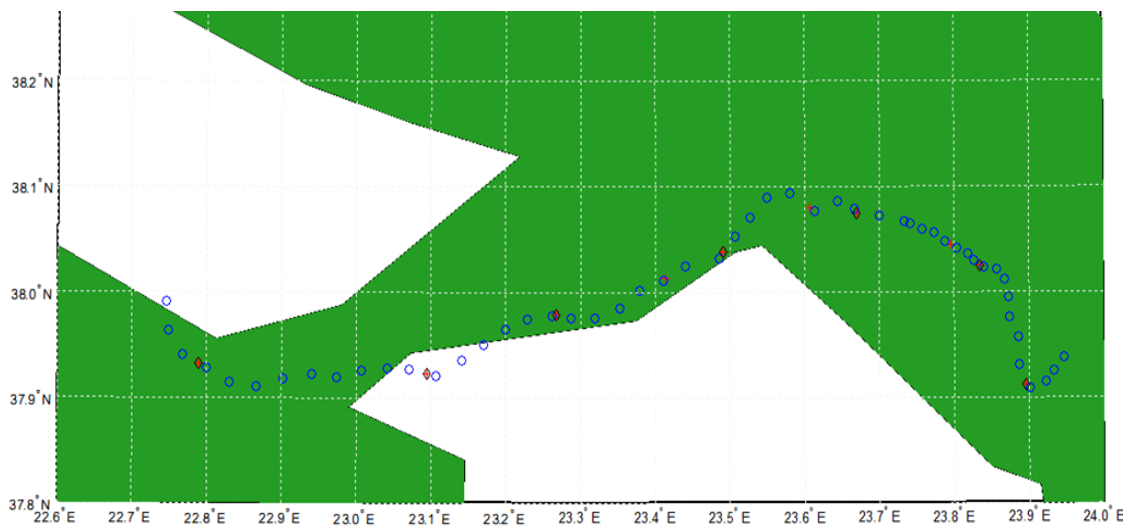
**Σχήμα 5.14: CAT - 11 σταθμοί βάσης (BSC1), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση**



**Σχήμα 5.15: GR - 11 σταθμοί βάσης (BSC1), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση**

➤ **10 σταθμοί βάσης (BSC2), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση.**

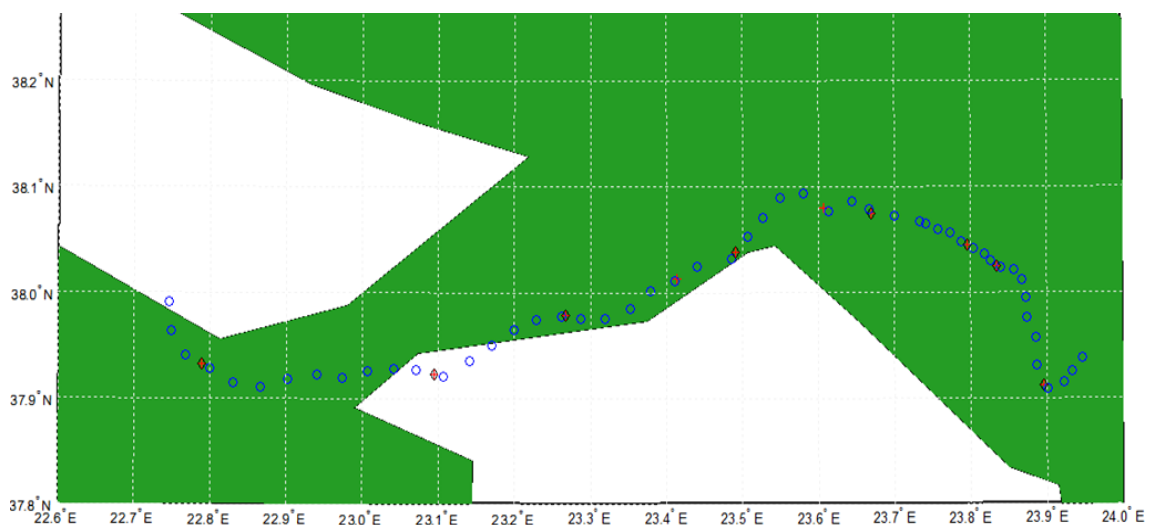
Τόσο ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT όσο και ο αλγόριθμος Greedy δίνουν ως λύση 7 σταθμούς βάσης οι οποίοι μπορούν να καλύψουν την περιοχή. Παρατηρείται ότι οι 5 από τους 7 σταθμούς βάσης στον CAT και GR αλγόριθμο είναι κοινός με τη αντίστοιχη λύση όταν συμπεριλαμβάνονται οι σταθμοί βάσης και των δύο BSC.



**Σχήμα 5.16: 10 σταθμοί βάσης (BSC2), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση**

➤ **10 σταθμοί βάσης (BSC2), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση.**

Παρομοίως στο αντίστοιχο σενάριο με σκίαση, τόσο ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT όσο και ο Greedy δίνουν ως λύση τους 8 σταθμούς βάσης. Παρατηρείται ότι οι 6 από τους 8 σταθμούς βάσης στον CAT αλγόριθμο και οι 5 από τους 8 σταθμούς βάσης στον GR αλγόριθμο είναι κοινός με τη αντίστοιχη λύση όταν συμπεριλαμβάνονται οι σταθμοί βάσης και των δύο BSC.



**Σχήμα 5.17: 10 σταθμοί βάσης (BSC2), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση**



Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα. Η πρώτη γραμμή περιλαμβάνει τη λύση για τους δύο αλγόριθμους που εφαρμόζονται σε όλους τους πιθανούς σταθμούς βάσης. Οι επόμενες δύο γραμμές περιλαμβάνουν τη λύση για τις περιπτώσεις λειτουργίας έκτακτης ανάγκης, όπου το πρόγραμμα έχει εκτελεστεί χωρίς να συμπεριλαμβάνεται το μοντέλο χωρητικότητας.

Αρχικοί σταθμοί βάσης	Σταθμοί Βάσης (CAT/GR)			
	χωρίς μοντέλο χωρητικότητας χωρίς σκίαση	χωρίς μοντέλο χωρητικότητας με σκίαση	με μοντέλο χωρητικότητας χωρίς σκίαση	με μοντέλο χωρητικότητας με σκίαση
21 (BSC1&2)	9/7	10/8	17/7	17/10
11 (BSC1)	7/6	9/8		
10 (BSC2)	7/7	8/8		

**Σχήμα 5.18: Αποτελέσματα περιοχής [1] Κιάτο – ΣΚΑ – Αεροδρόμιο**

Με μια γρήγορη ματιά στον πίνακα αποτελεσμάτων παρατηρούμε ότι όταν το πρόγραμμα εκτελείται χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, η λύση του CAT αλγορίθμου και η λύση του GR αλγορίθμου είτε είναι ίδιες (BSC2) είτε διαφέρουν κατά 1 ή 2 σταθμούς βάσης. Αυτό σημαίνει ότι η λύση του CAT αλγορίθμου συγκλίνει στη βελτιστοποιημένη λύση του GR αλγορίθμου και κατ'επέκταση ότι οι αρχικές επιλογές του αριθμού των επαναλήψεων και του αριθμού των ομάδων των σταθμών βάσης για τον αλγόριθμο CAT είναι σωστές. Όταν το πρόγραμμα εκτελείται με το μοντέλο χωρητικότητας υπάρχει διαφορά στις λύσεις των δύο αλγορίθμων. Ο αλγόριθμος CAT υπολογίζει με βάση τις απαιτήσεις κίνησης τον αριθμό των σταθμών βάσης, ενώ ο αλγόριθμος GR υπολογίζει, με βάση τη CAT λύση, απλά την κάλυψη των σημείων ελέγχου.

Από το σύνολο των αποτελεσμάτων παρατηρούμε ότι στη πρώτη περίπτωση (χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση) για τη πλήρη κάλυψη της περιοχής χρειάζονται 7 σταθμοί βάσης (BSC1&2). Με τον ίδιο περίπου αριθμό σταθμών βάσης καλύπτεται η περιοχή και για τα δύο σενάρια λειτουργίας έκτακτης ανάγκης (6 με BSC1, 7 με BSC2). Όμως μόνο 2 από τους 6 σταθμούς βάσης του BSC1 (GR αλγόριθμο) είναι κοινοί με τη αντίστοιχη λύση όταν συμπεριλαμβάνονται οι σταθμοί βάσης και των δύο BSC ενώ αντίστοιχα 5 από τους 7 σταθμούς βάσης του BSC2 είναι κοινοί. Για να υπάρχει απλά κάλυψη στη περιοχή απαιτούνται μόνο οι 7 σταθμοί βάσης της λύσης BSC1&2. Όμως, για να υπάρχει πλήρης κάλυψη της περιοχής ακόμα και σε λειτουργία έκτακτης ανάγκης απαιτείται το σύνολο των 13 σταθμών βάσης των δύο λύσεων BSC1 και BSC2.

Όμοια, για τη δεύτερη περίπτωση (χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση), για να υπάρχει απλά κάλυψη στη περιοχή απαιτούνται μόνο οι 8 σταθμοί βάσης της

λύσης BSC1&2, ενώ για να υπάρχει πλήρης κάλυψη της περιοχής ακόμα και σε λειτουργία έκτακτης ανάγκης απαιτείται το σύνολο των 16 σταθμών βάσης των δύο λύσεων BSC1 και BSC2.

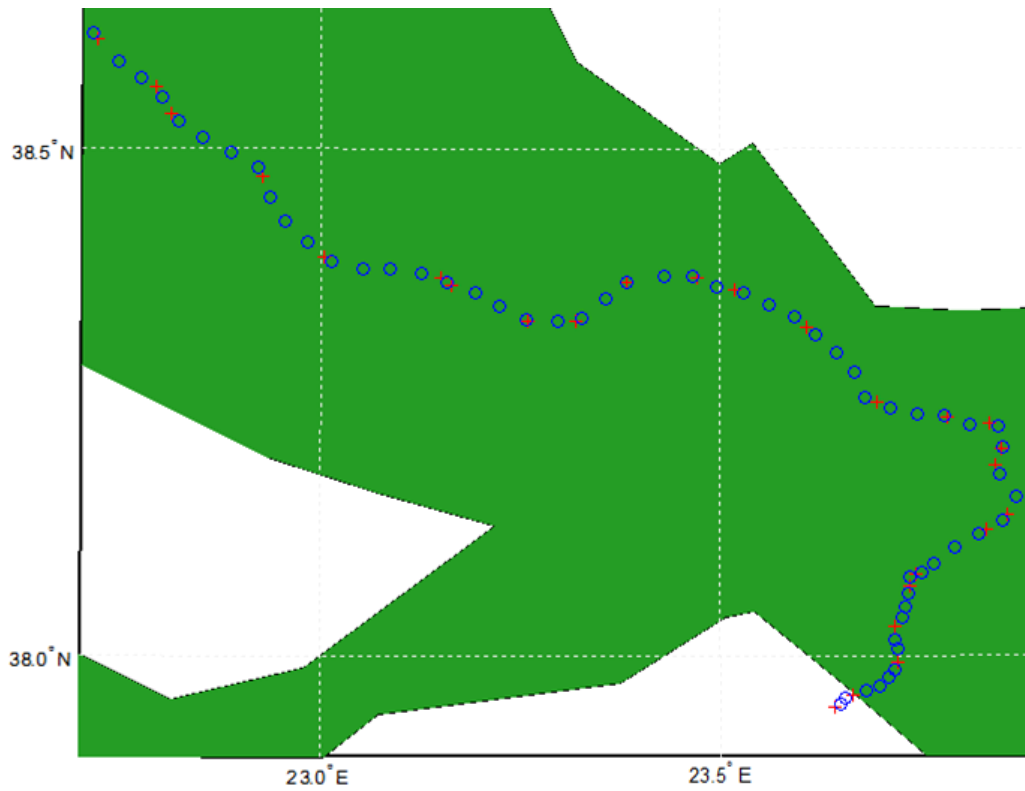
Στη τελευταία περίπτωση που υπολογίζεται και το μοντέλο χωρητικότητας χρειάζονται 17 σταθμοί βάσης για τη πλήρη ραδιοκάλυψη αλλά και για την κάλυψη της κίνησης της περιοχής, οι οποίες έχουν οριστεί πριν την εκτέλεση του προγράμματος. Παρατηρούμε ότι το σύνολο των 13 σταθμών βάσης των δύο λύσεων BSC1 και BSC2, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας και χωρίς σκίαση, είναι υποσύνολο των 17 σταθμών βάσης της λύσης με το μοντέλο χωρητικότητας και χωρίς σκίαση. Επιπλέον, οι υπόλοιποι 4 σταθμοί βάσης της λύσης αυτής βρίσκονται σε περιοχές υψηλής τηλεπικοινωνιακής κίνησης.

Τέλος παρατηρούμε ότι η σκίαση δεν παίζει ρόλο στον αριθμό των σταθμών βάσης όταν συνυπολογίζεται το μοντέλο χωρητικότητας. Όμως η σκίαση παίζει ρόλο στην επιλογή των θέσεων των σταθμών βάσης, κάτι που είναι λογικό λόγω της τυχαιότητας που εισάγει η έννοια της σκίασης.

### 5.3.2 Πειραιάς – Σιδηροδρομικός Σταθμός Αθηνών – Τιθορέα

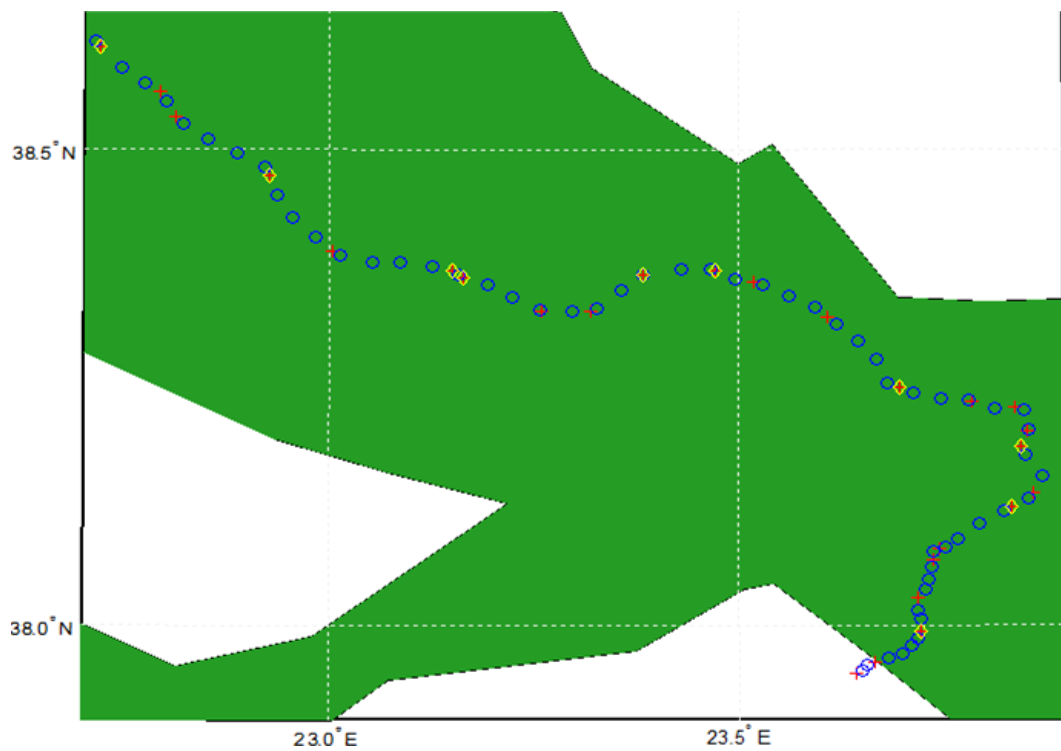
Η περιοχή Πειραιάς – Σιδηροδρομικός Σταθμός Αθηνών – Τιθορέα περιλαμβάνει συνολικά 26 σταθμούς βάσης και 58 σημεία ελέγχου. Οι σταθμοί βάσης και τα σημεία ελέγχου έχουν τοποθετηθεί κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής από το σιδηροδρομικό σταθμό Πειραιά έως το σιδηροδρομικό σταθμό Τιθορέας μέσω του Σιδηροδρομικού Σταθμού Αθηνών. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται με κόκκινο σταυρό οι σταθμοί βάσης και με μπλε κύκλο τα σημεία ελέγχου, που διαγράφουν μία νοητή γραμμή η οποία αναπαριστά την σιδηροδρομική γραμμή. Παρατηρούμε ότι εντός των αστικών περιοχών του Πειραιά και της Αθήνας, τις οποίες διασχίζει ο σιδηρόδρομος, ο αριθμός τόσο των πιθανών σταθμών βάσης όσο και των σημείων ελέγχου είναι μεγαλύτερος από ότι στις υπόλοιπες περιοχές.

Στη συνέχεια εκτελείται ο αλγόριθμος CAT για όλα τα σενάρια, λαμβάνοντας υπόψη ή όχι τις απώλειες σκίασης και το μοντέλο χωρητικότητας για όλους τους σταθμούς βάσης και για όσους αντιστοιχούν στα δύο διαφορετικά BSC. Επιπλέον εκτελείται και ο Greedy αλγόριθμος για βελτιστοποίηση της λύσης. Όλα τα αποτελέσματα και οι λύσεις και από τους δύο αλγορίθμους φαίνονται σε αντίστοιχα σχεδιαγράμματα. Στο τέλος ακολουθεί μία ανάλυση των αποτελεσμάτων αντίστοιχη με αυτή για την περιοχή [1] Κιάτο – ΣΚΑ – Αεροδρόμιο Αθηνών, της προηγούμενης παραγράφου.

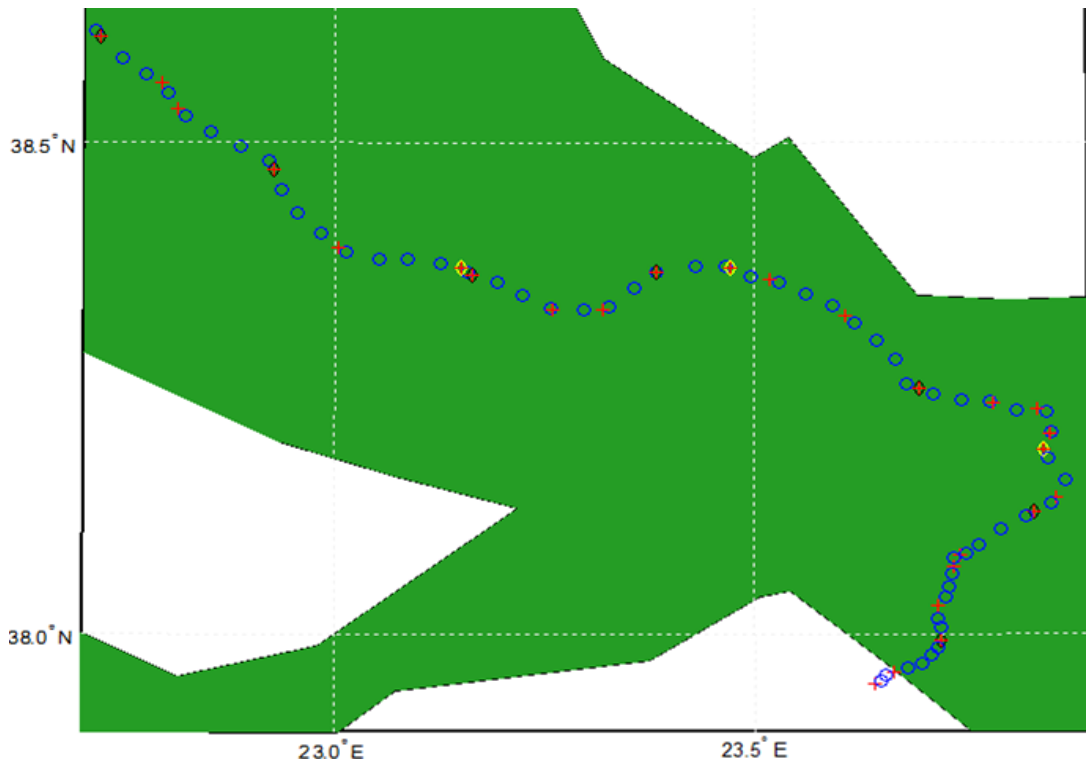


Σχήμα 5.19: Περιοχή Πειραιάς – Αθήνα – Τιθορέα

- **26 σταθμοί βάσης, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση.**  
 Ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT δίνει ως λύση 10 σταθμούς βάσης (σχήμα 5.20) ενώ ο αλγόριθμος Greedy δίνει 7 σταθμούς βάσης αντίστοιχα (σχήμα 5.21).



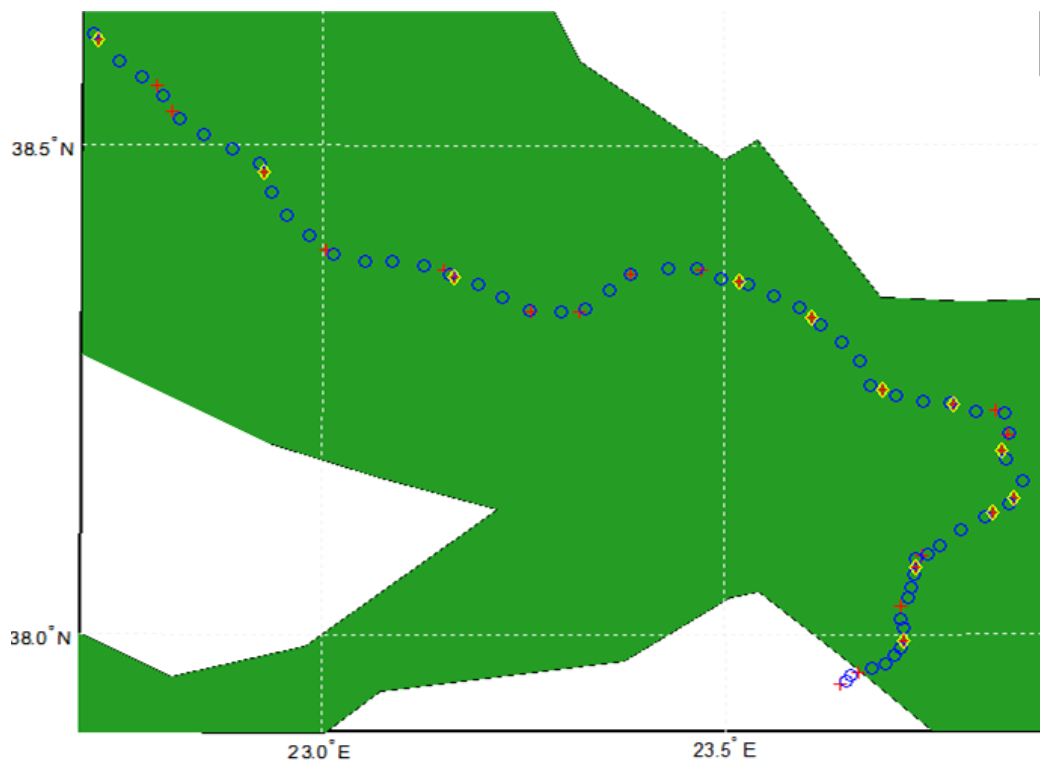
Σχήμα 5.20: CAT - 26 σταθμοί βάσης, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση



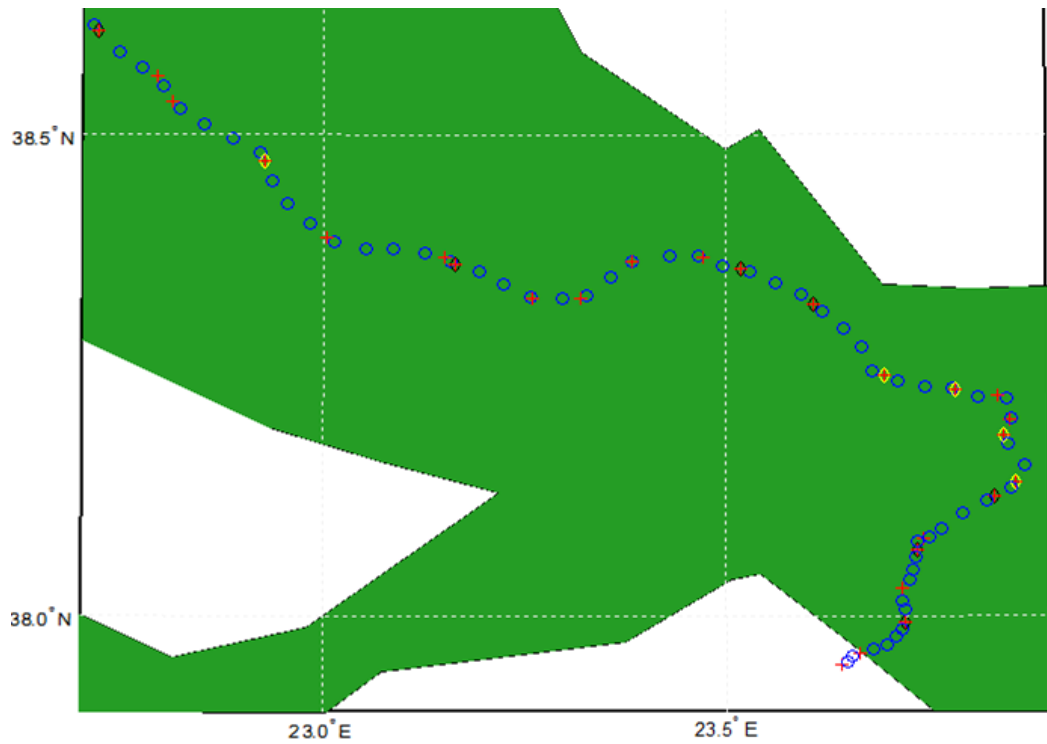
Σχήμα 5.21: GR - 26 σταθμοί βάσης, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση

➤ **26 σταθμοί βάσης, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση.**

Ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT δίνει ως λύση 12 σταθμούς βάσης (σχήμα 5.22) ενώ ο αλγόριθμος Greedy δίνει 7 σταθμούς βάσης αντίστοιχα (σχήμα 5.23).



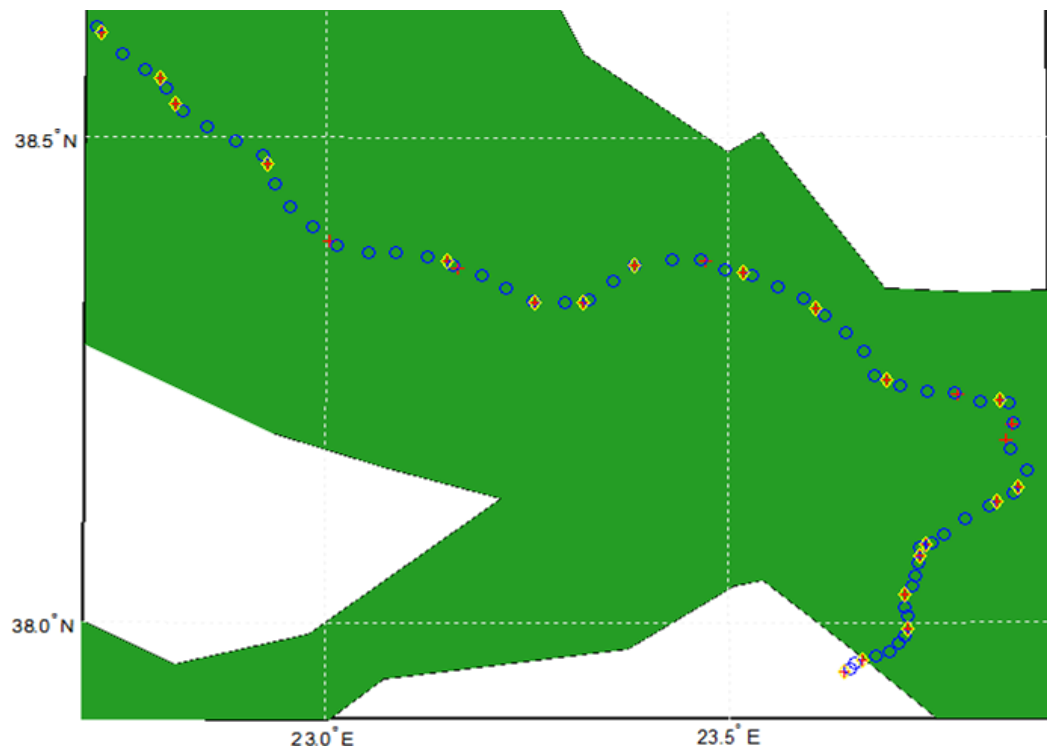
Σχήμα 5.22: CAT - 26 σταθμοί βάσης, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση



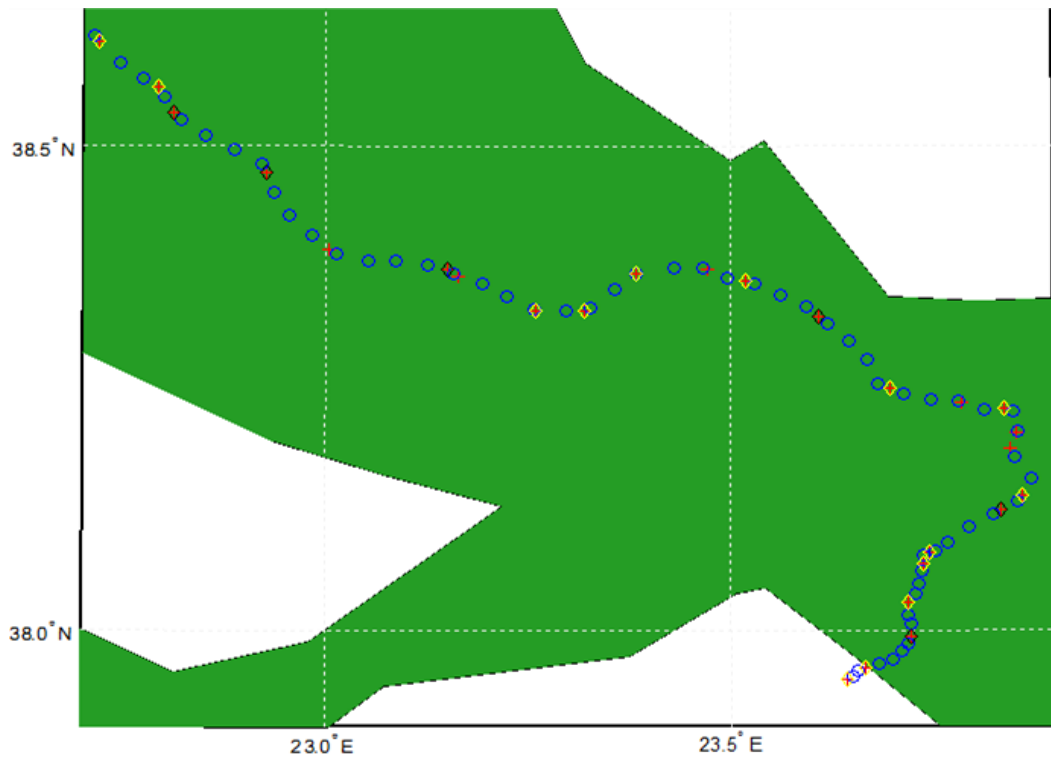
Σχήμα 5.23: GR - 26 σταθμοί βάσης, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση

➤ **26 σταθμοί βάσης, με το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση.**

Ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT δίνει ως λύση 20 σταθμούς βάσης (σχήμα 5.24) ενώ ο αλγόριθμος Greedy δίνει 6 σταθμούς βάσης αντίστοιχα (σχήμα 5.25).



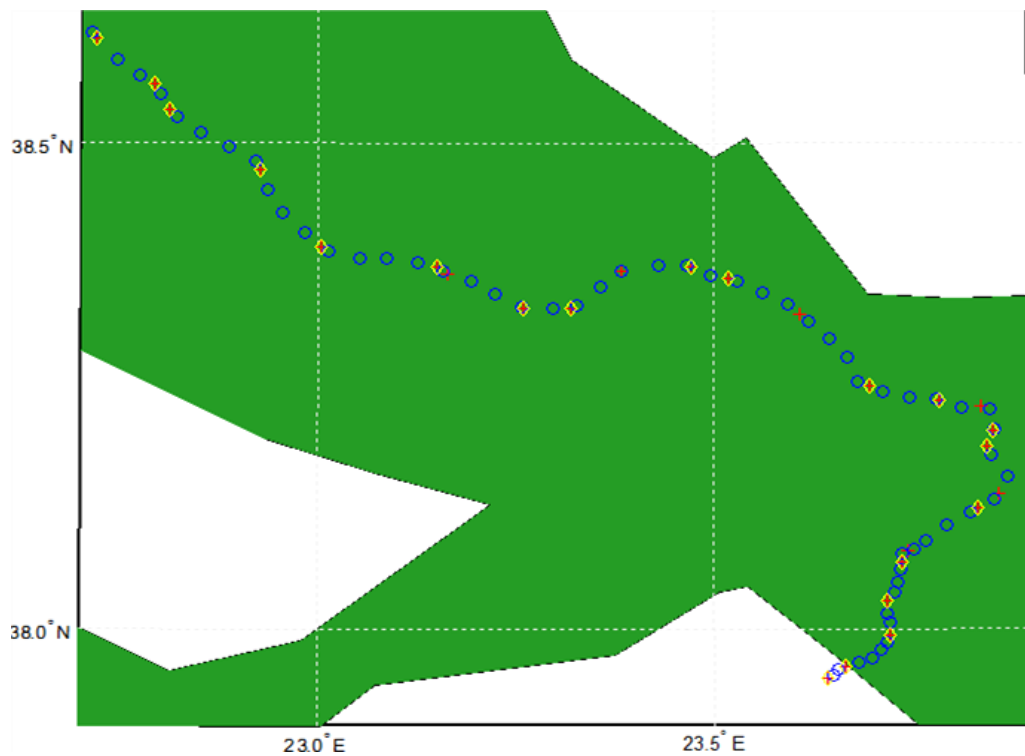
Σχήμα 5.24: CAT - 26 σταθμοί βάσης, με το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση



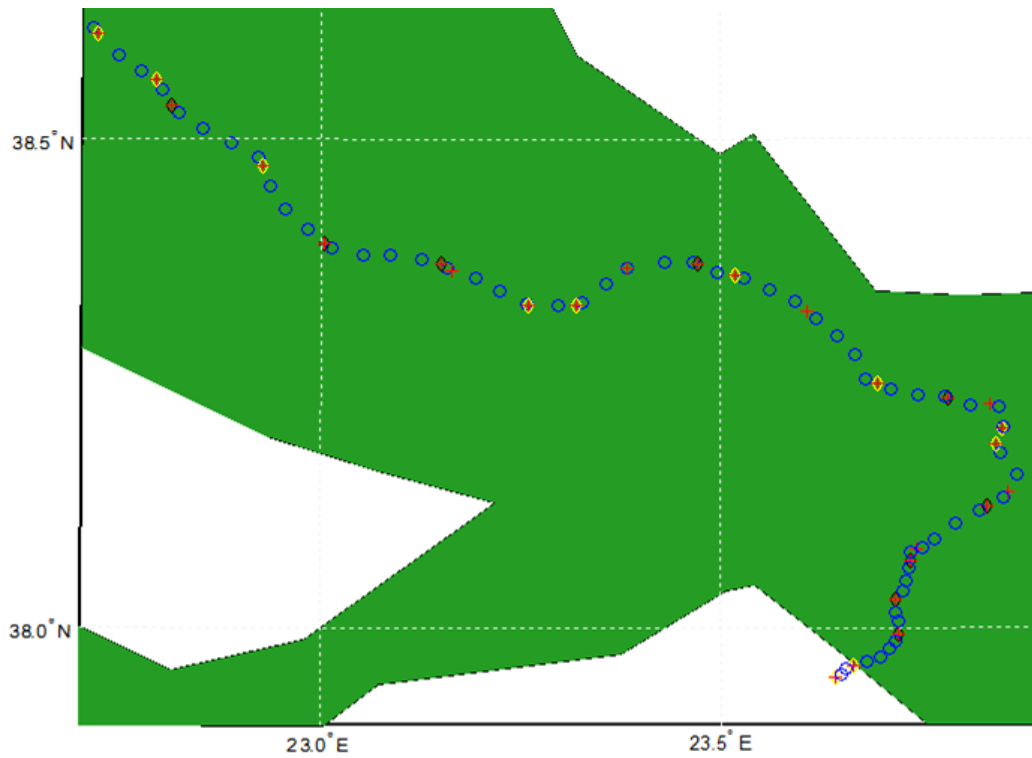
Σχήμα 5.25: GR - 26 σταθμοί βάσης, με το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση

➤ **26 σταθμοί βάσης, με το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση.**

Ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT δίνει ως λύση 20 σταθμούς βάσης (σχήμα 5.26) ενώ ο αλγόριθμος Greedy δίνει 9 σταθμούς βάσης αντίστοιχα (σχήμα 5.27).

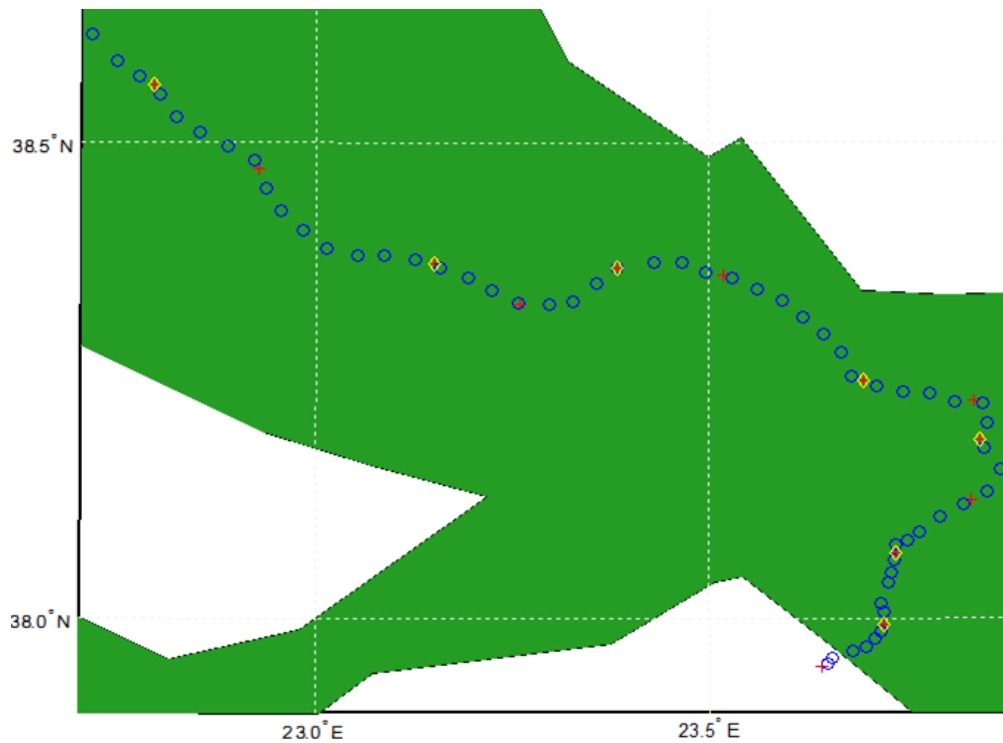


Σχήμα 5.26: CAT - 26 σταθμοί βάσης, με το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση



Σχήμα 5.27: GR - 26 σταθμοί βάσης, με το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση

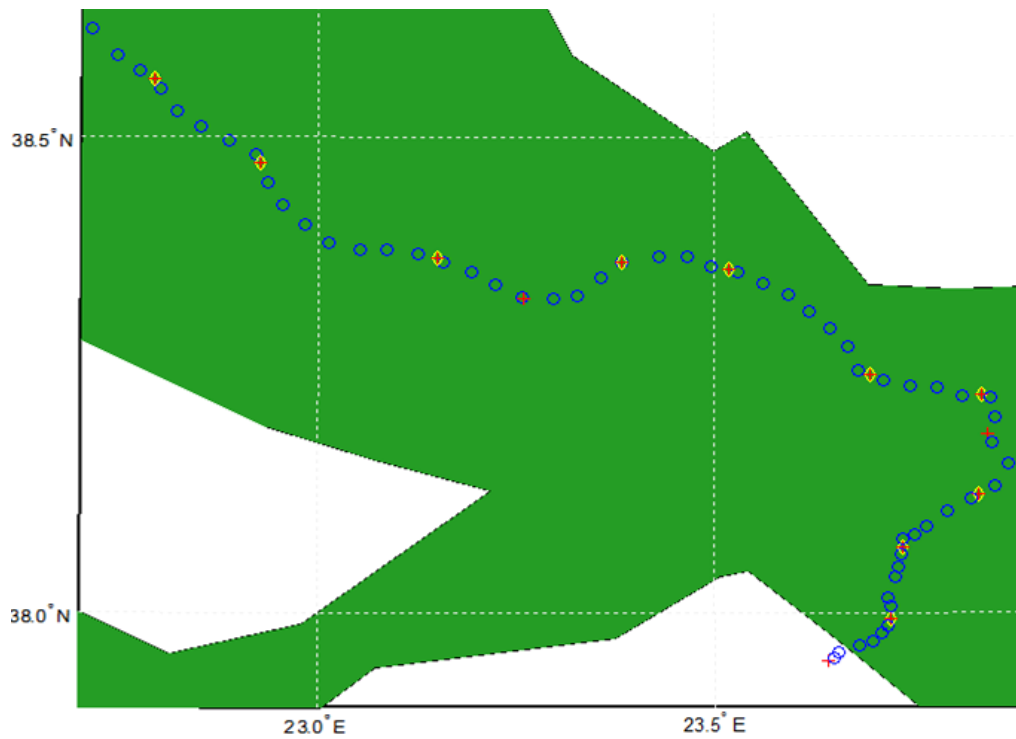
- **13 σταθμοί βάσης (BSC1), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση.**  
Οι αλγόριθμοι CAT και Greedy δίνουν ως λύση 7 σταθμούς βάσης (σχήμα 5.28).



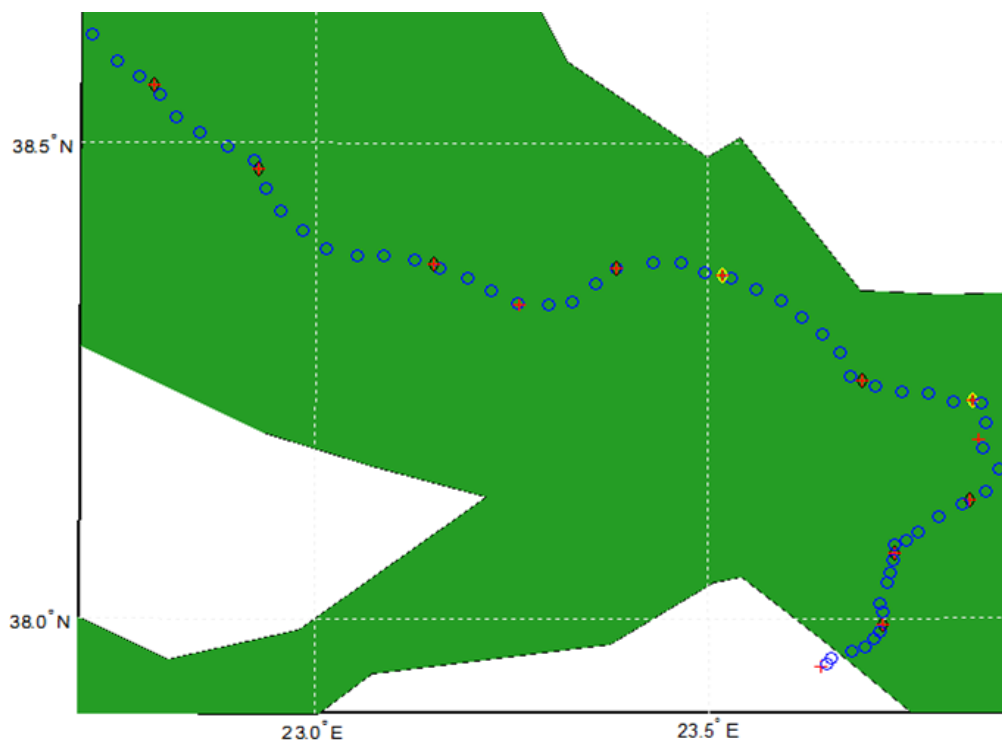
Σχήμα 5.28: 13 σταθμοί βάσης (BSC1), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση

➤ **13 σταθμοί βάσης (BSC1), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση.**

Ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT δίνει ως λύση 10 σταθμούς βάσης (σχήμα 5.29) ενώ ο αλγόριθμος Greedy δίνει 8 σταθμούς βάσης αντίστοιχα (σχήμα 5.30).



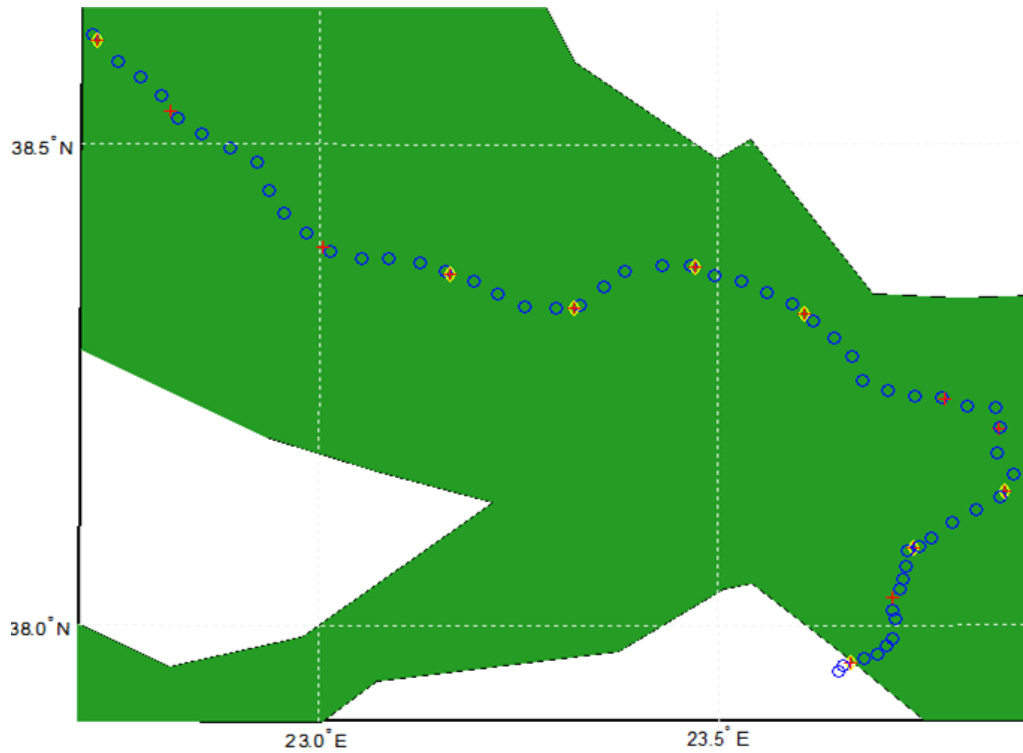
Σχήμα 5.29: CAT - 13 σταθμοί βάσης (BSC1), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση



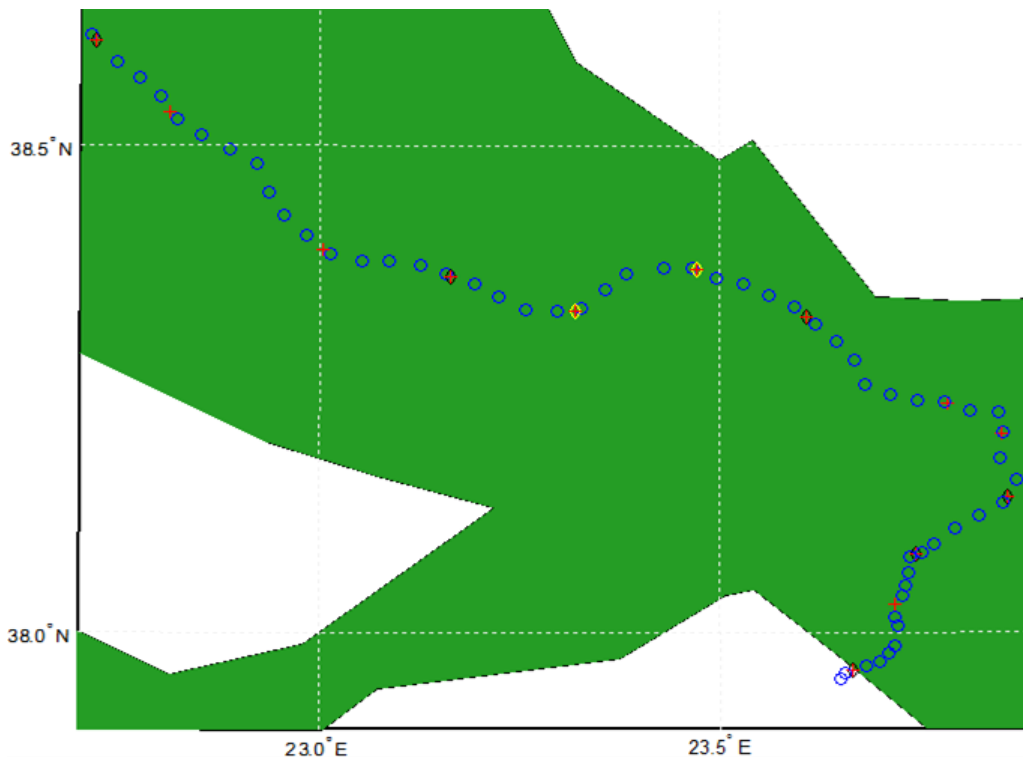
Σχήμα 5.30: GR - 13 σταθμοί βάσης (BSC1), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση



- **13 σταθμοί βάσης (BSC2), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση.**  
Ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT δίνει ως λύση 8 σταθμούς βάσης (σχήμα 5.31) ενώ ο αλγόριθμος Greedy δίνει 6 σταθμούς βάσης αντίστοιχα (σχήμα 5.32).



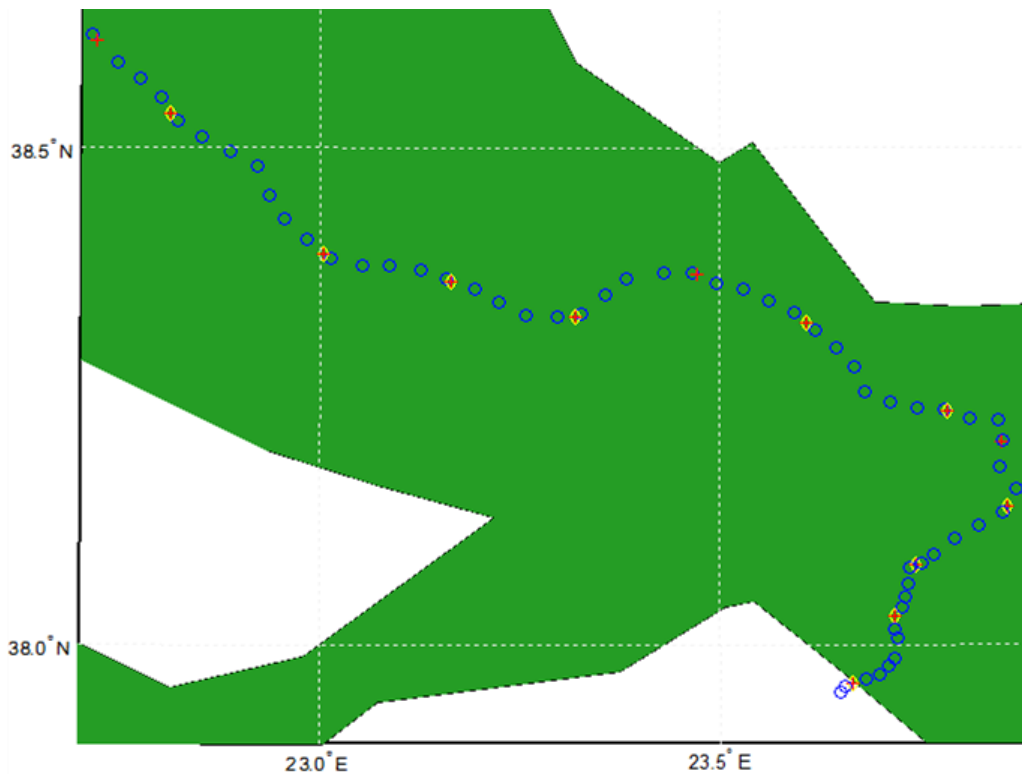
Σχήμα 5.31: CAT - 13 σταθμοί βάσης (BSC2), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση



Σχήμα 5.32: GR - 13 σταθμοί βάσης (BSC2), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση

➤ **13 σταθμοί βάσης (BSC2), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση.**

Οι αλγόριθμοι CAT και Greedy δίνουν ως λύση 10 σταθμούς βάσης (σχήμα 5.33).



**Σχήμα 5.33: 13 σταθμοί βάσης (BSC2), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση**

Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα. Η πρώτη γραμμή περιλαμβάνει τη λύση για τους δύο αλγόριθμους που εφαρμόζονται σε όλους τους πιθανούς σταθμούς βάσης. Οι επόμενες δύο γραμμές περιλαμβάνουν τη λύση για τις περιπτώσεις λειτουργίας έκτακτης ανάγκης, όπου το πρόγραμμα έχει εκτελεστεί χωρίς να συμπεριλαμβάνεται το μοντέλο χωρητικότητας.

Αρχικοί σταθμοί βάσης	Σταθμοί Βάσης (CAT/GR)			
	χωρίς μοντέλο χωρητικότητας χωρίς σκίαση	χωρίς μοντέλο χωρητικότητας με σκίαση	με μοντέλο χωρητικότητας χωρίς σκίαση	με μοντέλο χωρητικότητας με σκίαση
26 (BSC1&2)	10/7	12/7	20/6	20/9
13 (BSC1)	7/7	10/8		
13 (BSC2)	8/6	10/10		

**Σχήμα 5.34: Αποτελέσματα περιοχής [2] Πειραιάς – Αθήνα – Τιθορέα**

Από το σύνολο των αποτελεσμάτων παρατηρούμε, όπως και στην ανάλυση της προηγούμενης παραγράφου, ότι στη πρώτη περίπτωση (χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση) για τη πλήρη κάλυψη της περιοχής χρειάζονται 7 σταθμοί βάσης (BSC1&2), ενώ για να υπάρχει πλήρης κάλυψη της περιοχής ακόμα και σε λειτουργία έκτακτης ανάγκης απαιτείται το σύνολο των 13 σταθμών βάσης των

δύο λύσεων BSC1 και BSC2. Όμοια, για τη δεύτερη περίπτωση (χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση), για να υπάρχει απλά κάλυψη στη περιοχή απαιτούνται μόνο οι 7 σταθμοί βάσης της λύσης BSC1&2, ενώ για να υπάρχει πλήρης κάλυψη της περιοχής ακόμα και σε λειτουργία έκτακτης ανάγκης απαιτείται το σύνολο των 18 σταθμών βάσης των δύο λύσεων BSC1 και BSC2.

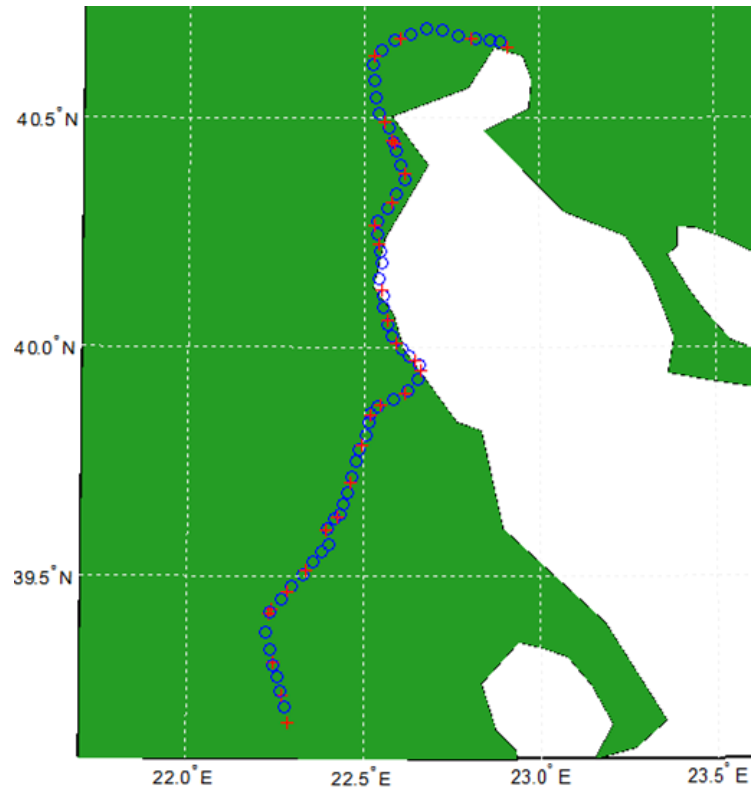
Στη τελευταία περίπτωση που υπολογίζεται και το μοντέλο χωρητικότητας χρειάζονται 20 σταθμοί βάσης για τη πλήρη ραδιοκάλυψη αλλά και για την κάλυψη της κίνησης της περιοχής. Παρατηρούμε ότι το σύνολο των 13 σταθμών βάσης των δύο λύσεων BSC1 και BSC2, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας και χωρίς σκίαση, είναι υποσύνολο των 20 σταθμών βάσης της λύσης με το μοντέλο χωρητικότητας και χωρίς σκίαση. Επιπλέον, οι υπόλοιποι 7 σταθμοί βάσης της λύσης αυτής τοποθετούνται για να καλύψουν την τηλεπικοινωνιακή κίνηση. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι η σκίαση δεν παίζει τόσο σημαντικό ρόλο στον αριθμό των σταθμών βάσης όσο το μοντέλο χωρητικότητας, αλλά παίζει ρόλο στην επιλογή των θέσεων των σταθμών βάσης.

### 5.3.3 Δομοκός – Λάρισα – Θεσσαλονίκη

Η περιοχή Δομοκός – Λάρισα – Θεσσαλονίκη περιλαμβάνει συνολικά 30 σταθμούς βάσης και 60 σημεία ελέγχου. Οι σταθμοί βάσης και τα σημεία ελέγχου έχουν τοποθετηθεί κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής από το σιδηροδρομικό σταθμό Δομοκού έως το σιδηροδρομικό σταθμό Θεσσαλονίκης μέσω του Σιδηροδρομικού Σταθμού Λάρισας. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται με κόκκινο σταυρό οι σταθμοί βάσης και με μπλε κύκλο τα σημεία ελέγχου.

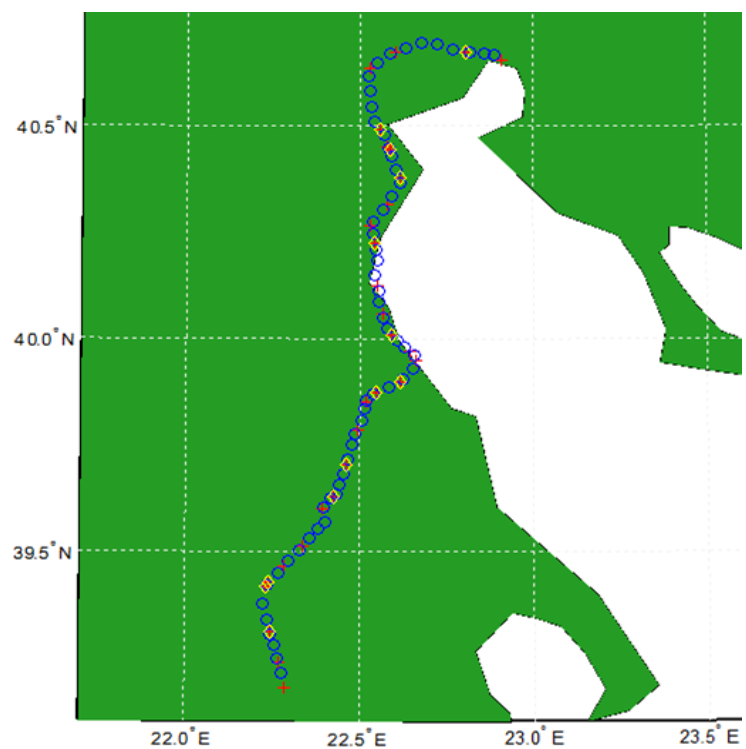
Η περιοχή αυτή είναι η μεγαλύτερη και πιο ομοιόμορφη σε όλο το μήκος της. Αν και η σιδηροδρομική γραμμή διασχίζει αστικές περιοχές όπως η Λάρισα και η Θεσσαλονίκη, παρόλα αυτά οι απαιτήσεις χωρητικότητας του δικτύου δεν είναι όσες εκείνες της περιοχής των Αθηνών. Για αυτό υπάρχει μια σχετική ομοιομορφία στην αρχική τοποθέτηση των σταθμών βάσης. Τυχόν μεγαλύτερες απαιτήσεις χωρητικότητας αντιμετωπίζεται με την τοποθέτηση σταθμών βάσης που προσφέρουν μεγαλύτερη χωρητικότητα στο δίκτυο GSM-R, με βάση τη διαστασιοποίησή τους.

Αμέσως μετά εκτελείται ο αλγόριθμος CAT για όλα τα σενάρια, λαμβάνοντας υπόψη ή όχι τις απώλειες σκίασης και το μοντέλο χωρητικότητας για όλους τους σταθμούς βάσης και για όσους αντιστοιχούν στα δύο διαφορετικά BSC. Επιπλέον εκτελείται και ο Greedy αλγόριθμος για βελτιστοποίηση της λύσης. Όλα τα αποτελέσματα και οι λύσεις και από τους δύο αλγορίθμους φαίνονται σε αντίστοιχα σχεδιαγράμματα.

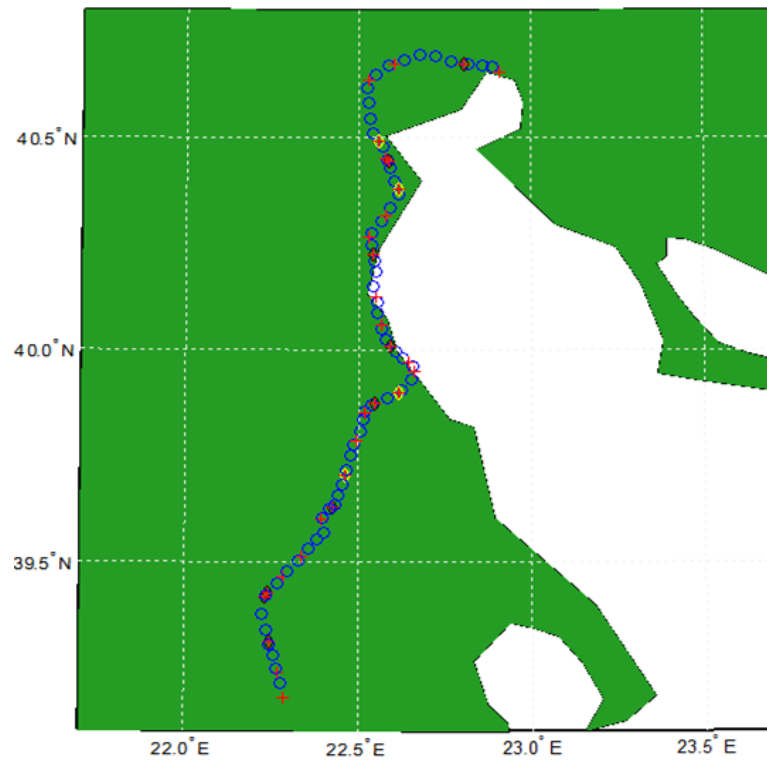


Σχήμα 5.35: Περιοχή Δομοκός – Λάρισσα – Θεσσαλονίκη

- **30 σταθμοί βάσης, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση.**  
 Ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT δίνει ως λύση 13 σταθμούς βάσης (σχήμα 5.36) ενώ ο αλγόριθμος Greedy δίνει 9 σταθμούς βάσης αντίστοιχα (σχήμα 5.37).



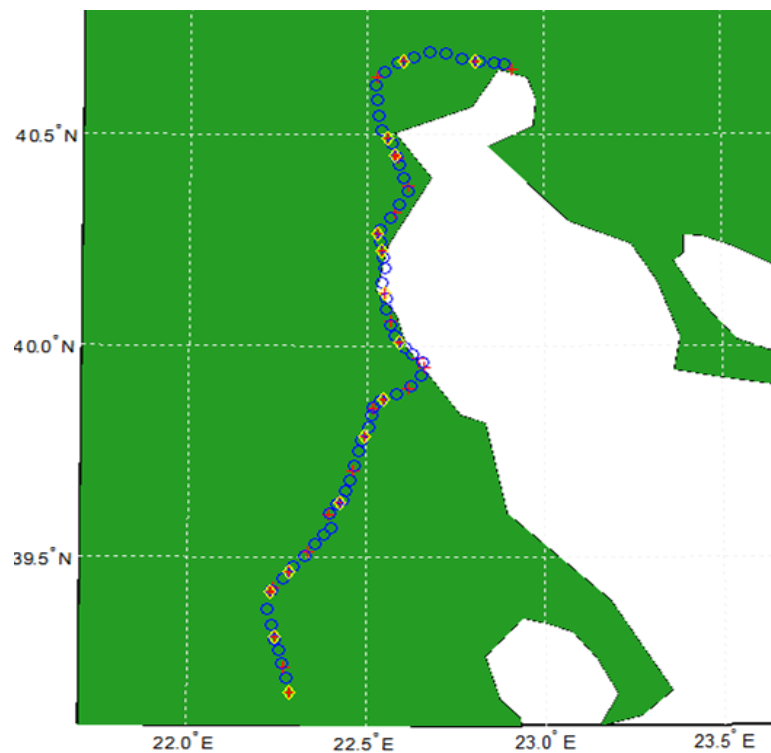
Σχήμα 5.36: CAT - 30 σταθμοί βάσης, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση



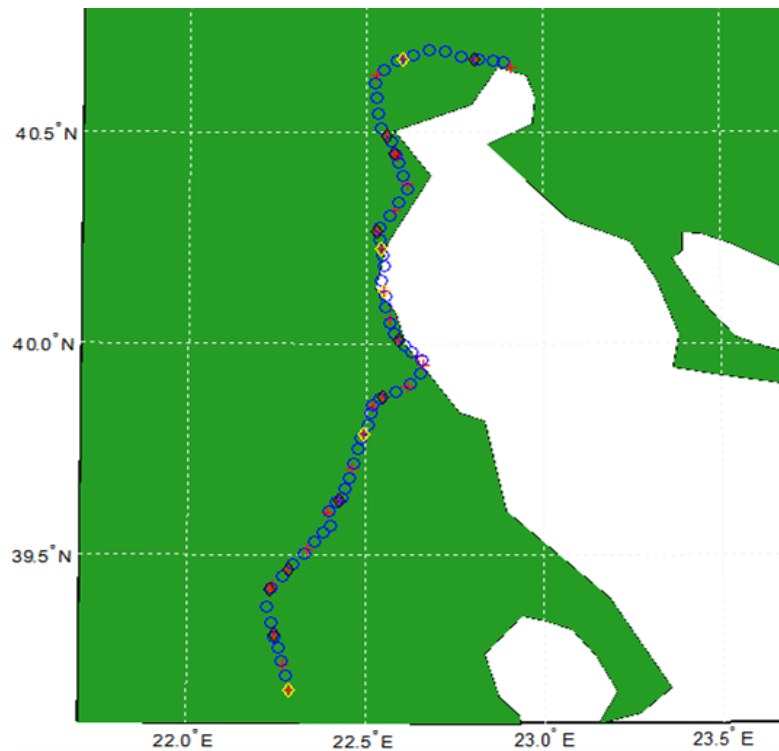
Σχήμα 5.37: GR - 30 σταθμοί βάσης, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση

➤ **30 σταθμοί βάσης, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση.**

Ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT δίνει ως λύση 15 σταθμούς βάσης (σχήμα 5.38) ενώ ο αλγόριθμος Greedy δίνει 10 σταθμούς βάσης αντίστοιχα (σχήμα 5.39).



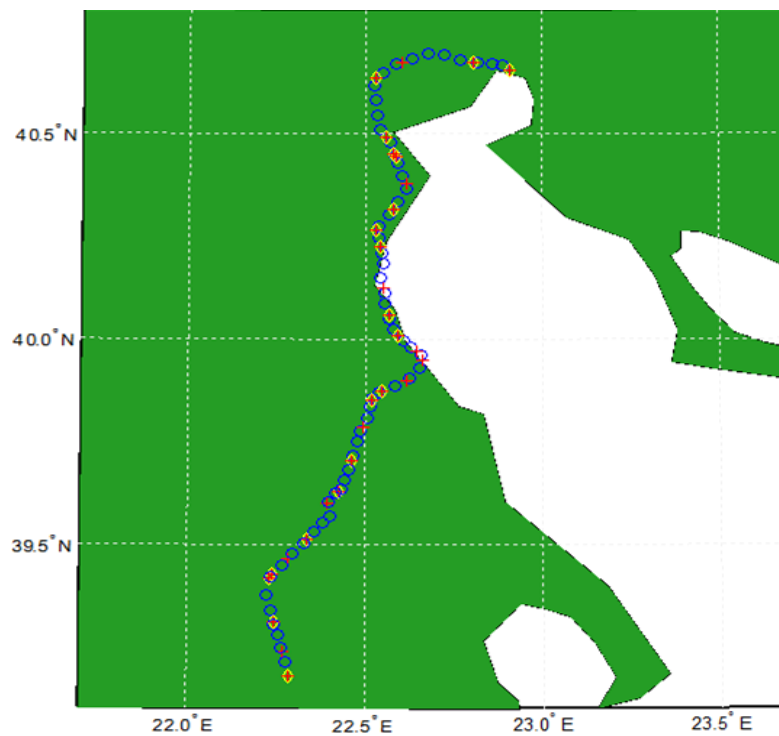
Σχήμα 5.38: CAT - 30 σταθμοί βάσης, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση



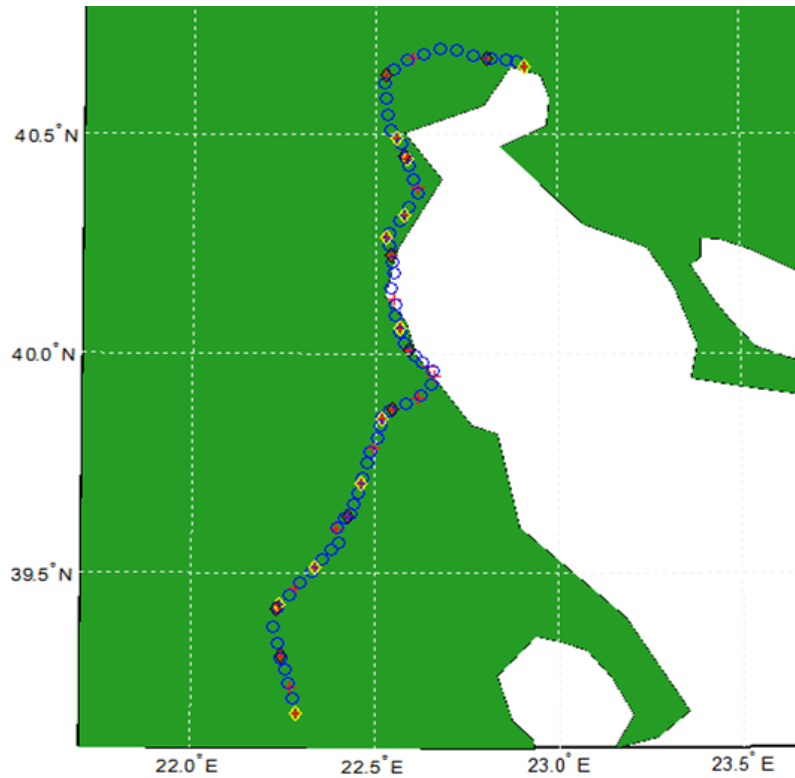
Σχήμα 5.39: GR - 30 σταθμοί βάσης, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση

➤ **30 σταθμοί βάσης, με το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση.**

Ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT δίνει ως λύση 20 σταθμούς βάσης (σχήμα 5.40) ενώ ο αλγόριθμος Greedy δίνει 9 σταθμούς βάσης αντίστοιχα (σχήμα 5.41).



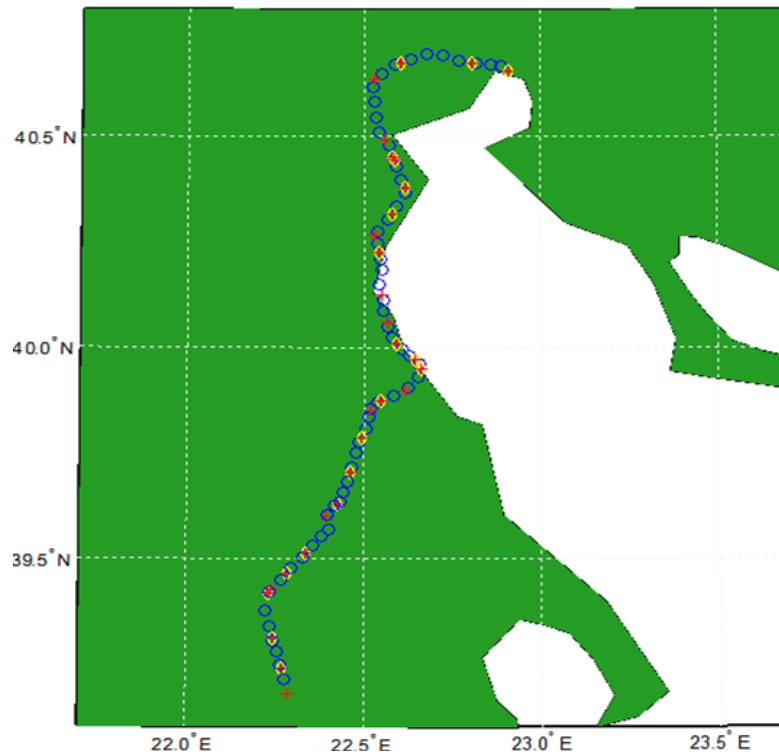
Σχήμα 5.40: CAT - 30 σταθμοί βάσης, με το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση



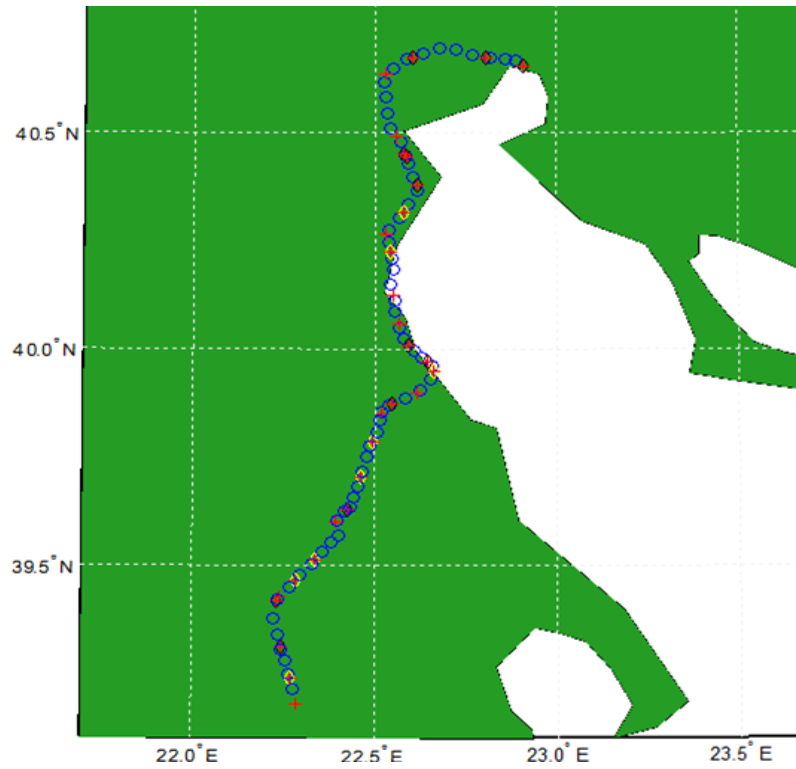
Σχήμα 5.41: GR - 30 σταθμοί βάσης, με το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση

➤ **30 σταθμοί βάσης, με το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση.**

Ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT δίνει ως λύση 20 σταθμούς βάσης (σχήμα 5.42) ενώ ο αλγόριθμος Greedy δίνει 12 σταθμούς βάσης αντίστοιχα (σχήμα 5.43).

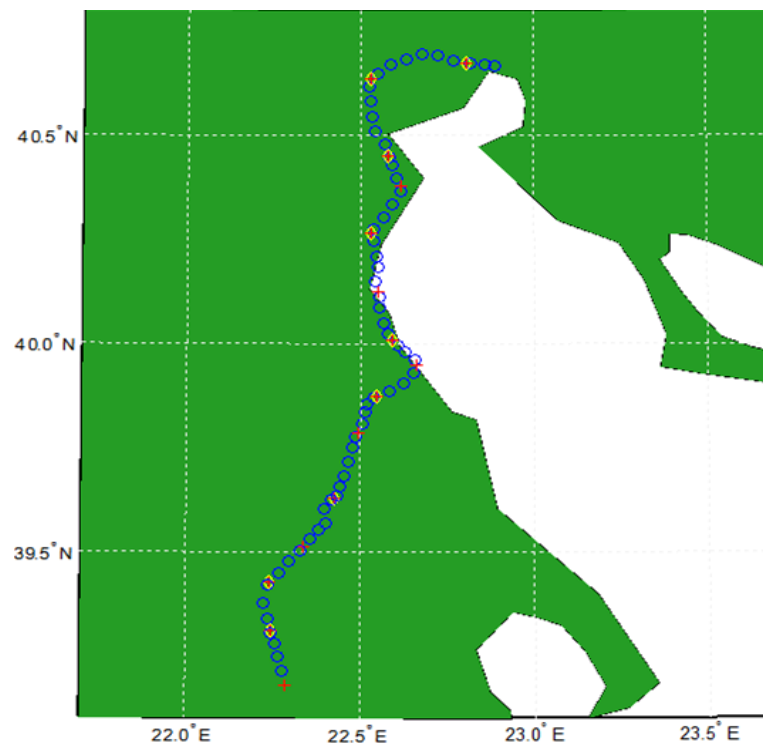


Σχήμα 5.42: CAT - 30 σταθμοί βάσης, με το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση



Σχήμα 5.43: GR - 30 σταθμοί βάσης, με το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση

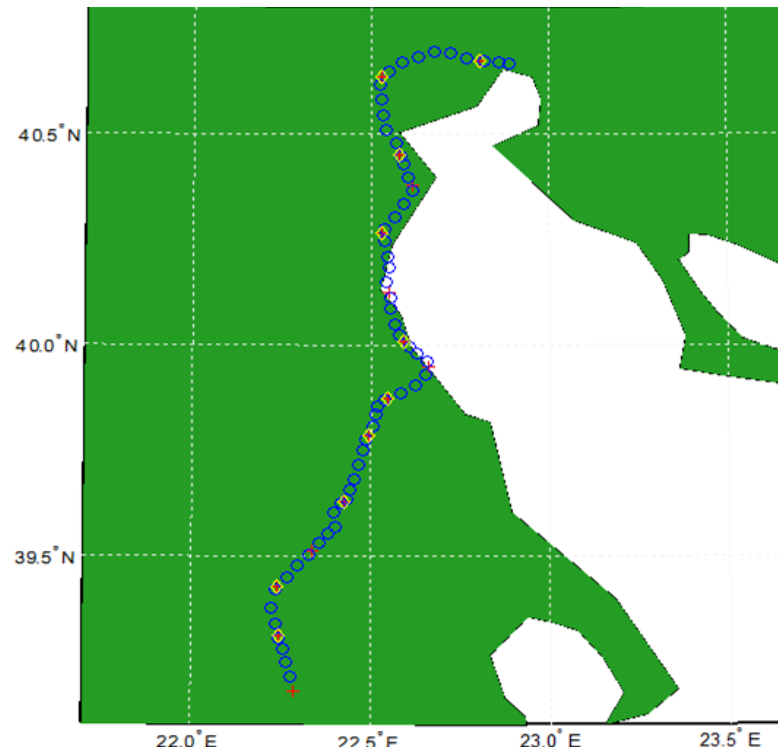
- **15 σταθμοί βάσης (BSC1), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση.**  
Οι αλγόριθμοι CAT και Greedy δίνουν ως λύση 9 σταθμούς βάσης (σχήμα 5.44).



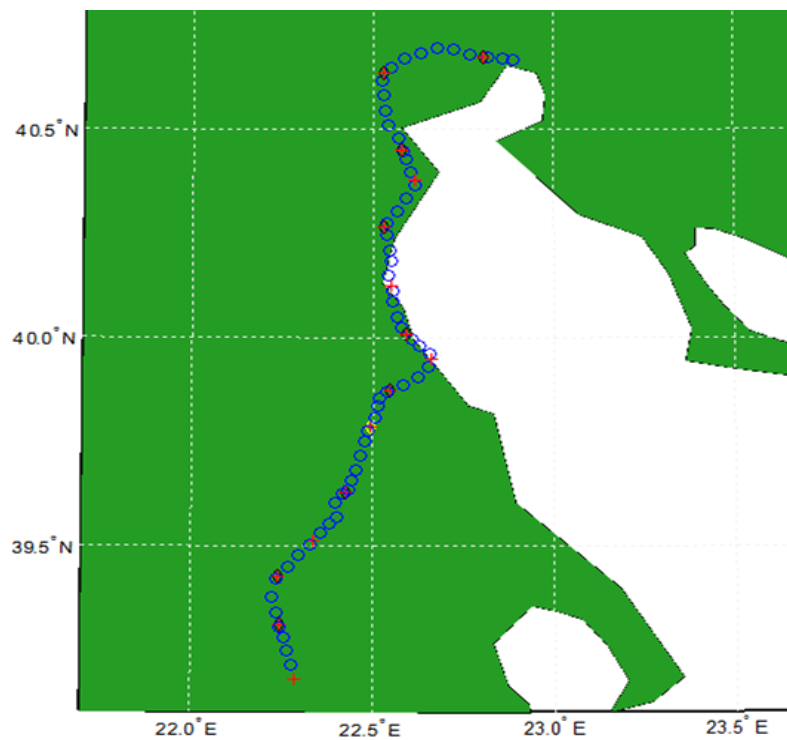
Σχήμα 5.44: 15 σταθμοί βάσης (BSC1), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση



- **15 σταθμοί βάσης (BSC1), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση.**  
Ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT δίνει ως λύση 10 σταθμούς βάσης (σχήμα 5.45) ενώ ο αλγόριθμος Greedy δίνει 9 σταθμούς βάσης αντίστοιχα (σχήμα 5.46).

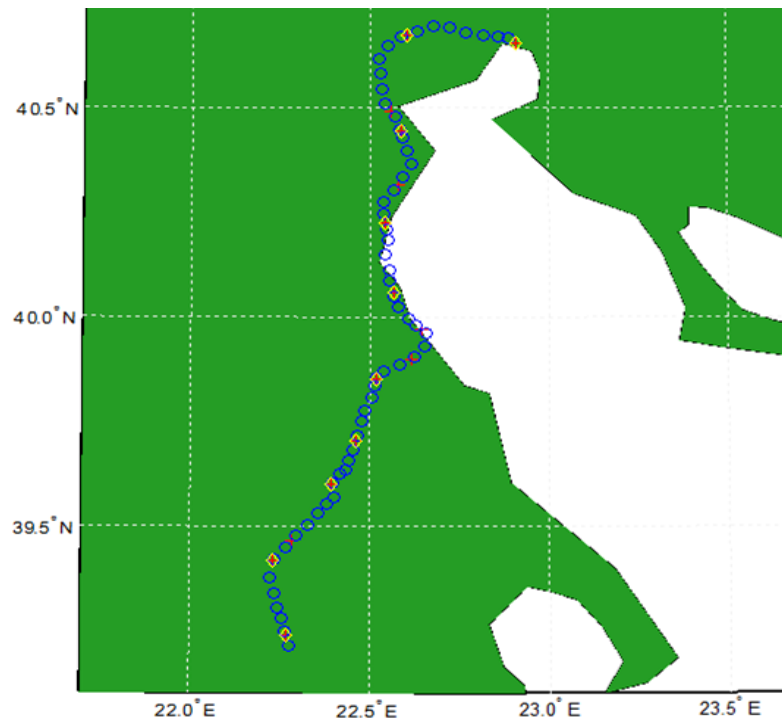


Σχήμα 5.45: CAT - 15 σταθμοί βάσης (BSC1), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση



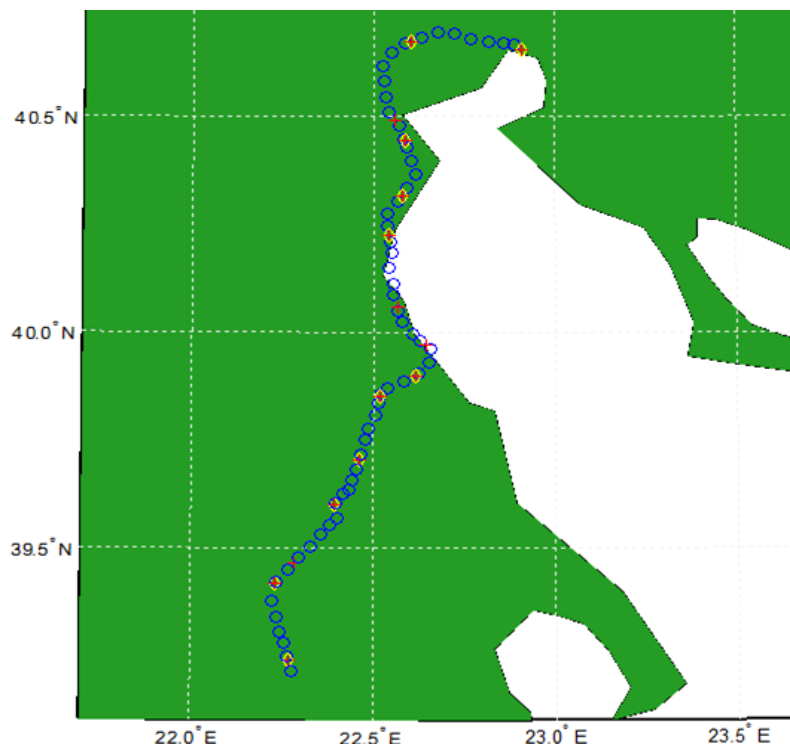
Σχήμα 5.46: GR - 15 σταθμοί βάσης (BSC1), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση

- **15 σταθμοί βάσης (BSC2), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση.**  
Οι αλγόριθμοι CAT και Greedy δίνουν ως λύση 10 σταθμούς βάσης (σχήμα 5.47).



Σχήμα 5.47: 15 σταθμοί βάσης (BSC2), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση

- **15 σταθμοί βάσης (BSC2), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση.**  
Οι αλγόριθμοι CAT και Greedy δίνουν ως λύση 11 σταθμούς βάσης (σχήμα 5.48).



Σχήμα 5.48: 15 σταθμοί βάσης (BSC2), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση

Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα. Η πρώτη γραμμή περιλαμβάνει τη λύση για τους δύο αλγόριθμους που εφαρμόζονται σε όλους τους πιθανούς σταθμούς βάσης. Οι επόμενες δύο γραμμές περιλαμβάνουν τη λύση για τις περιπτώσεις λειτουργίας έκτακτης ανάγκης, όπου το πρόγραμμα έχει εκτελεστεί χωρίς να συμπεριλαμβάνεται το μοντέλο χωρητικότητας.

Αρχικοί σταθμοί βάσης	Σταθμοί Βάσης (CAT/GR)			
	χωρίς μοντέλο χωρητικότητας χωρίς σκίαση	χωρίς μοντέλο χωρητικότητας με σκίαση	με μοντέλο χωρητικότητας χωρίς σκίαση	με μοντέλο χωρητικότητας με σκίαση
30 (BSC1&2)	13/9	15/10	20/9	20/12
15 (BSC1)	9/9	10/9		
15 (BSC2)	10/10	11/11		

**Σχήμα 5.49: Αποτελέσματα περιοχής [3] Δομοκός – Λάρισα – Θεσσαλονίκη**

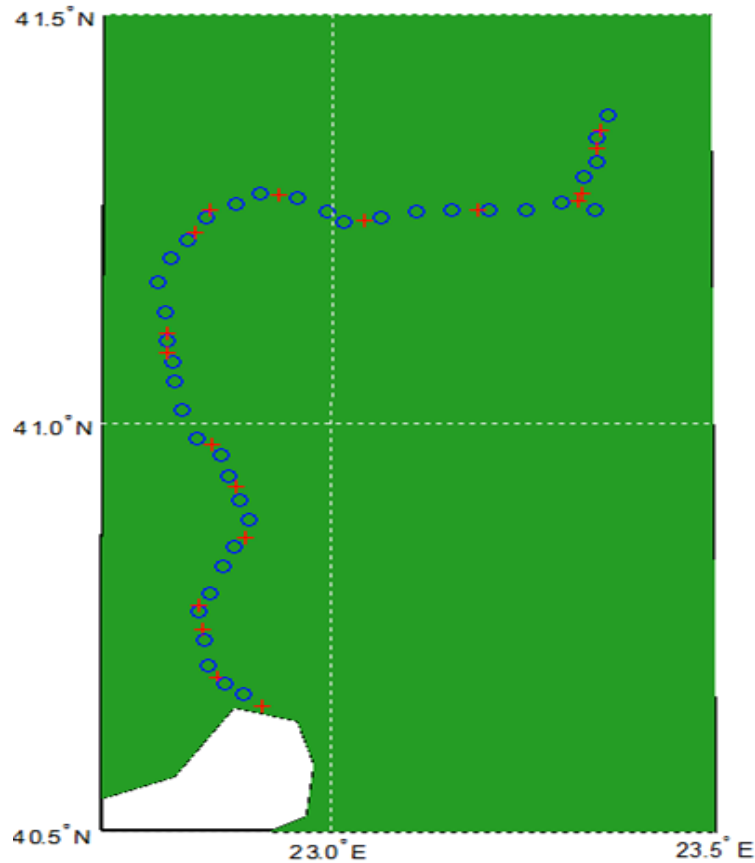
Από το σύνολο των αποτελεσμάτων παρατηρούμε ότι στη πρώτη περίπτωση (χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση) για τη πλήρη κάλυψη της περιοχής χρειάζονται 9 σταθμοί βάσης (BSC1&2), ενώ για να υπάρχει πλήρης κάλυψη της περιοχής ακόμα και σε λειτουργία έκτακτης ανάγκης απαιτείται το σύνολο των 19 σταθμών βάσης των δύο λύσεων BSC1 και BSC2. Όμοια, για τη δεύτερη περίπτωση (χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση), για να υπάρχει απλά κάλυψη στη περιοχή απαιτούνται μόνο οι 10 σταθμοί βάσης της λύσης BSC1&2, ενώ για να υπάρχει πλήρης κάλυψη της περιοχής ακόμα και σε λειτουργία έκτακτης ανάγκης απαιτείται το σύνολο των 19 σταθμών βάσης των δύο λύσεων BSC1 και BSC2.

Στη τελευταία περίπτωση που υπολογίζεται και το μοντέλο χωρητικότητας χρειάζονται 20 σταθμοί βάσης για τη πλήρη ραδιοκάλυψη αλλά και για την κάλυψη της κίνησης της περιοχής. Παρατηρούμε ότι το σύνολο των 9 σταθμών βάσης των δύο λύσεων BSC1 και BSC2, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας και χωρίς σκίαση, είναι υποσύνολο των 20 σταθμών βάσης της λύσης με το μοντέλο χωρητικότητας και χωρίς σκίαση. Επιπλέον, οι υπόλοιποι 11 σταθμοί βάσης της λύσης αυτής τοποθετούνται για να καλύψουν την τηλεπικοινωνιακή κίνηση. Το ίδιο ισχύει και στη περίπτωση με το μοντέλο χωρητικότητας και με σκίαση.

#### 5.3.4 Θεσσαλονίκη – Προμαχώνας

Η περιοχή Θεσσαλονίκη – Προμαχώνας περιλαμβάνει συνολικά 18 σταθμούς βάσης και 38 σημεία ελέγχου. Οι σταθμοί βάσης και τα σημεία ελέγχου έχουν τοποθετηθεί κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής από το σιδηροδρομικό σταθμό

Θεσσαλονίκης έως τον σιδηροδρομικό σταθμό Προμαχώννα στα ελληνοβουλγαρικά σύνορα. Η περιοχή αυτή είναι κυρίως μη αστική και η μικρότερη από όλες τις υπόλοιπες. Η σιδηροδρομική γραμμή διασχίζει κυρίως επαρχιακές μικρές πόλεις. Στο σχήμα 5.50 φαίνονται με κόκκινο σταυρό οι σταθμοί βάσης και με μπλε κύκλο τα σημεία ελέγχου.

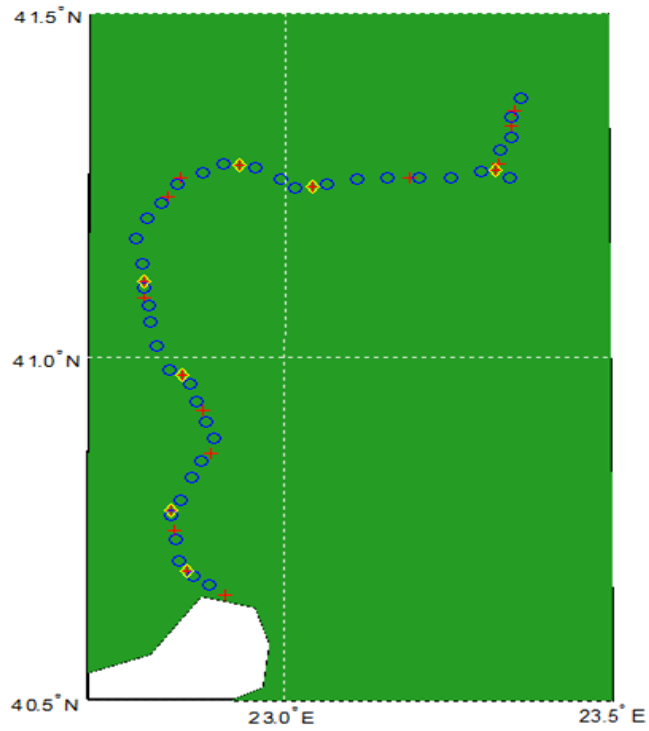


Σχήμα 5.50: Περιοχή Θεσσαλονίκη – Προμαχώννας

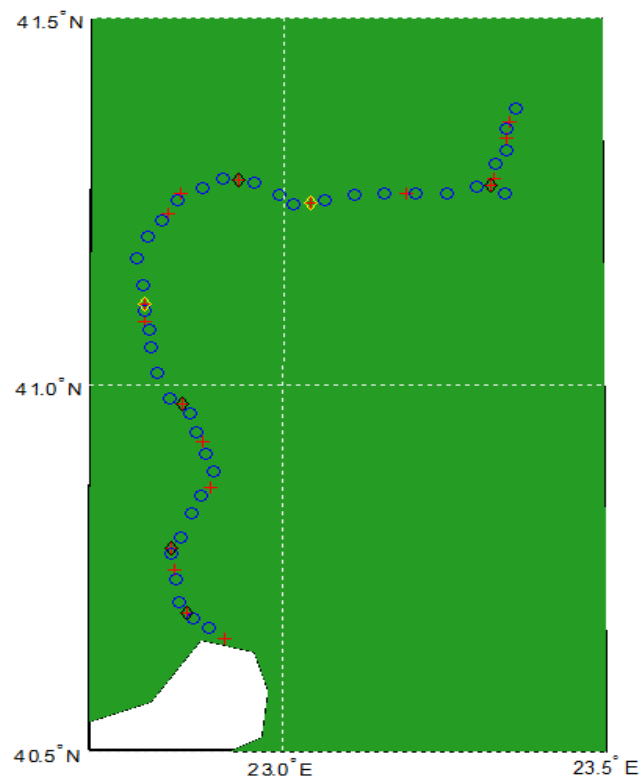
Στη συνέχεια εκτελείται ο αλγόριθμος CAT για όλα τα σενάρια, λαμβάνοντας υπόψη ή όχι τις απώλειες σκίασης και το μοντέλο χωρητικότητας για όλους τους σταθμούς βάσης και για όσους αντιστοιχούν στα δύο διαφορετικά BSC. Επιπλέον εκτελείται και ο Greedy αλγόριθμος για βελτιστοποίηση της λύσης. Όλα τα αποτελέσματα και οι λύσεις και από τους δύο αλγορίθμους φαίνονται σε αντίστοιχα σχεδιαγράμματα. Με κίτρινο ρόμβο αναπαριστάται η λύση του CAT αλγόριθμου και με μαύρο ρόμβο η λύση του Greedy αλγόριθμου.

➤ **18 σταθμοί βάσης, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση.**

Ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT δίνει ως λύση 7 σταθμούς βάσης (σχήμα 5.51) ενώ ο αλγόριθμος Greedy δίνει 5 σταθμούς βάσης αντίστοιχα (σχήμα 5.52).

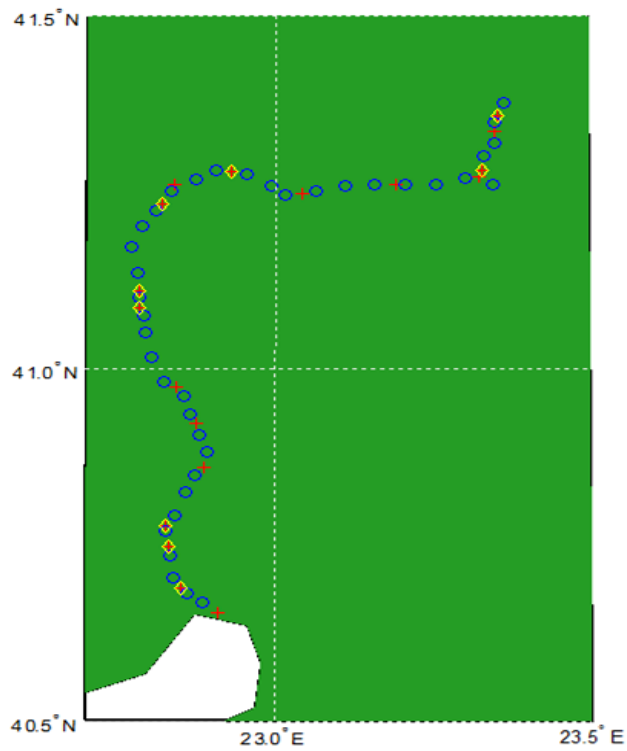


Σχήμα 5.51: CAT - 18 σταθμοί βάσης, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση

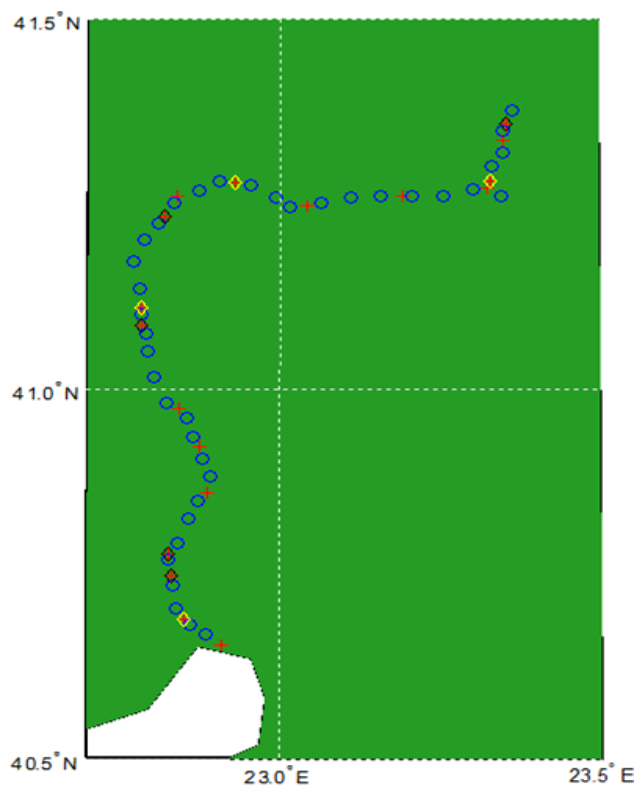


Σχήμα 5.52: GR - 18 σταθμοί βάσης, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση

- **18 σταθμοί βάσης, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση.**  
 Ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT δίνει ως λύση 9 σταθμούς βάσης (σχήμα 5.53) ενώ ο αλγόριθμος Greedy δίνει 5 σταθμούς βάσης αντίστοιχα (σχήμα 5.54).



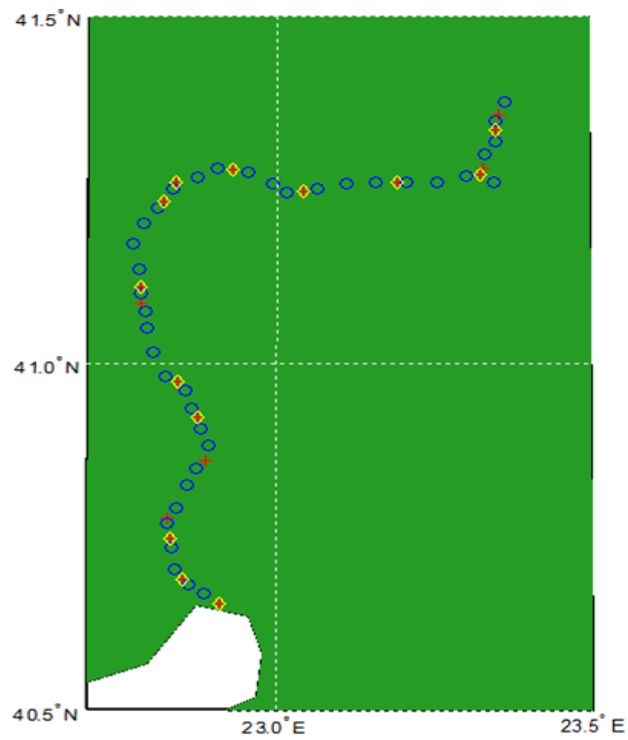
Σχήμα 5.53: CAT - 18 σταθμοί βάσης, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση



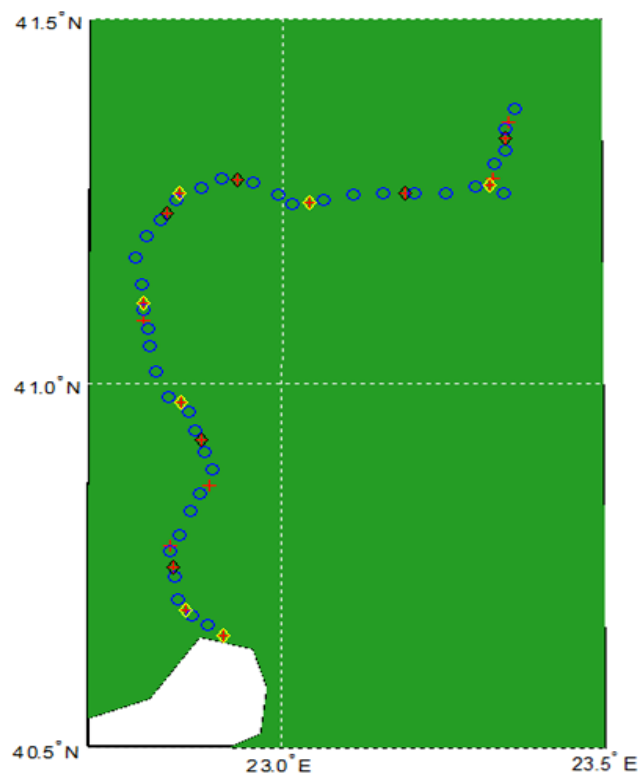
Σχήμα 5.54: GR - 18 σταθμοί βάσης, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση

➤ **18 σταθμοί βάσης, με το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση.**

Ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT δίνει ως λύση 13 σταθμούς βάσης (σχήμα 5.55) ενώ ο αλγόριθμος Greedy δίνει 6 σταθμούς βάσης αντίστοιχα (σχήμα 5.56).



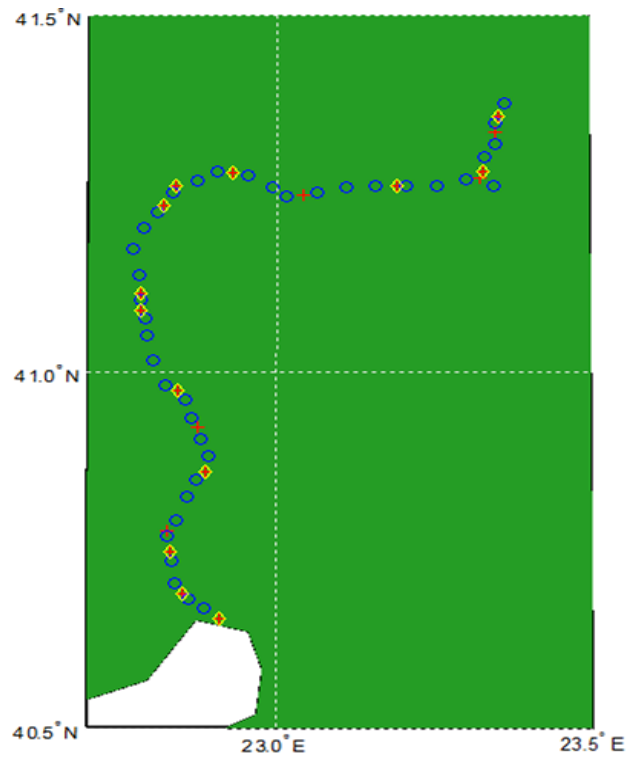
Σχήμα 5.55: CAT - 18 σταθμοί βάσης, με το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση



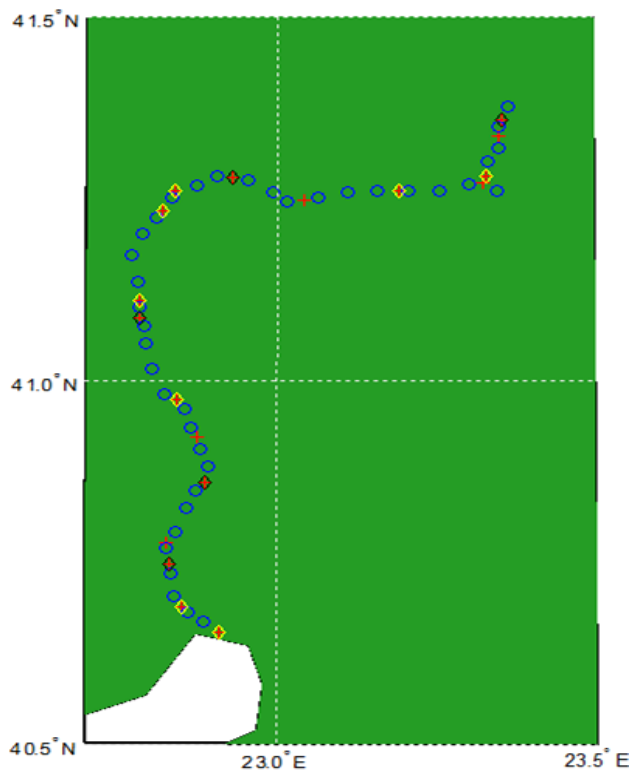
Σχήμα 5.56: GR - 18 σταθμοί βάσης, με το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση

➤ **18 σταθμοί βάσης, με το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση.**

Ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT δίνει ως λύση 13 σταθμούς βάσης (σχήμα 5.57) ενώ ο αλγόριθμος Greedy δίνει 5 σταθμούς βάσης αντίστοιχα (σχήμα 5.58).



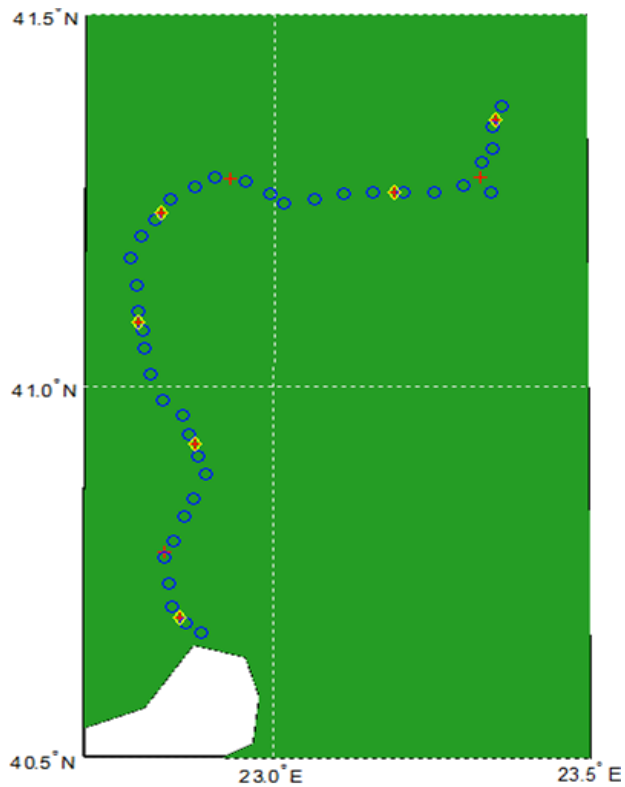
Σχήμα 5.57: CAT - 18 σταθμοί βάσης, με το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση



Σχήμα 5.58: GR - 18 σταθμοί βάσης, με το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση

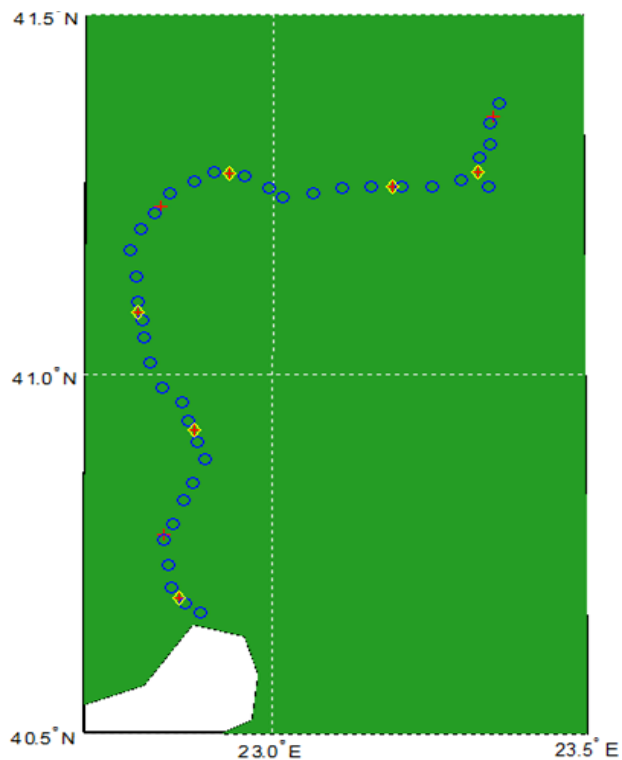
- 9 σταθμοί βάσης (BSC1), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση.  
Οι αλγόριθμοι CAT και Greedy δίνουν ως λύση 6 σταθμούς βάσης (σχήμα 5.59).



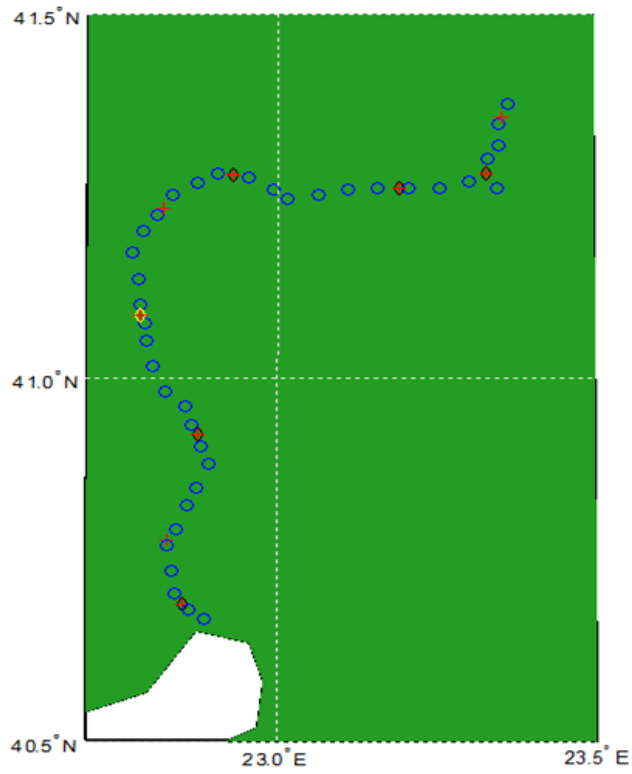


Σχήμα 5.59: 9 σταθμοί βάσης (BSC1), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση

- **9 σταθμοί βάσης (BSC1), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση.**  
 Ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT δίνει ως λύση 6 σταθμούς βάσης (σχήμα 5.60) ενώ ο αλγόριθμος Greedy δίνει 5 σταθμούς βάσης αντίστοιχα (σχήμα 5.61).

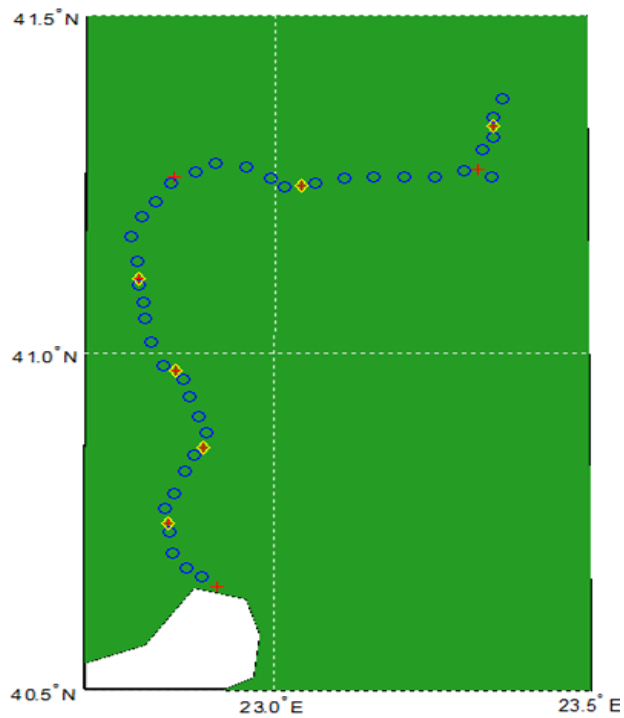


Σχήμα 5.60: CAT - 9 σταθμοί βάσης (BSC1), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση



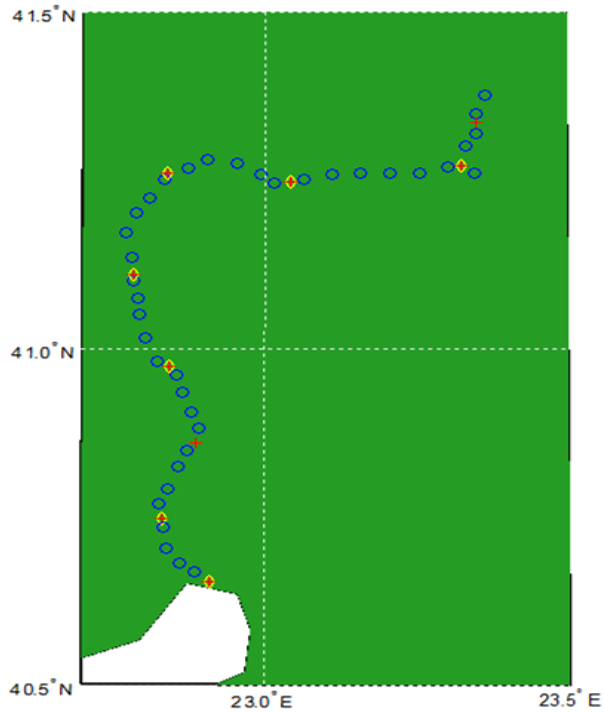
Σχήμα 5.61: GR - 9 σταθμοί βάσης (BSC1), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση

- **9 σταθμοί βάσης (BSC2), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση.**  
Οι αλγόριθμοι CAT και Greedy δίνουν ως λύση 6 σταθμούς βάσης (σχήμα 5.62).

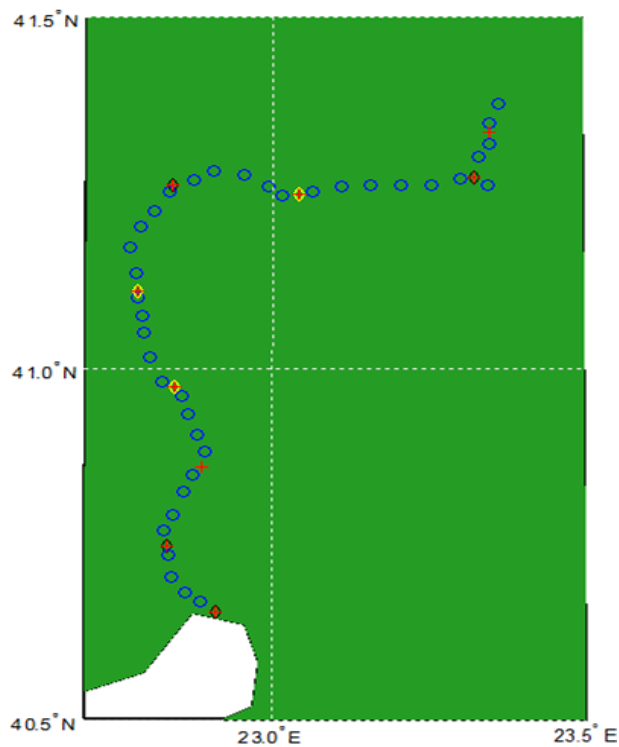


Σχήμα 5.62: 9 σταθμοί βάσης (BSC2), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση

- **9 σταθμοί βάσης (BSC2), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση.**  
Ο συνδυαστικός αλγόριθμος CAT δίνει ως λύση 7 σταθμούς βάσης (σχήμα 5.63) ενώ ο αλγόριθμος Greedy δίνει 4 σταθμούς βάσης αντίστοιχα (σχήμα 5.64).



Σχήμα 5.63: CAT - 9 σταθμοί βάσης (BSC2), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση



Σχήμα 5.64: GR - 9 σταθμοί βάσης (BSC2), χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση

Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα. Η πρώτη γραμμή περιλαμβάνει τη λύση για τους δύο αλγόριθμους που εφαρμόζονται σε όλους τους πιθανούς σταθμούς βάσης. Οι επόμενες δύο γραμμές περιλαμβάνουν τη λύση για τις περιπτώσεις λειτουργίας έκτακτης ανάγκης, όπου το πρόγραμμα έχει εκτελεστεί χωρίς να συμπεριλαμβάνεται το μοντέλο χωρητικότητας.

Αρχικοί σταθμοί βάσης	Σταθμοί Βάσης (CAT/GR)			
	χωρίς μοντέλο χωρητικότητας χωρίς σκίαση	χωρίς μοντέλο χωρητικότητας με σκίαση	με μοντέλο χωρητικότητας χωρίς σκίαση	με μοντέλο χωρητικότητας με σκίαση
18 (BSC1&2)	7/5	9/5	13/6	13/5
9 (BSC1)	6/6	6/5		
9 (BSC2)	6/6	7/4		

**Σχήμα 5.65: Αποτελέσματα περιοχής [4] Θεσσαλονίκη – Προμαχώνας**

Από το σύνολο των αποτελεσμάτων παρατηρούμε ότι στη πρώτη περίπτωση (χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, χωρίς σκίαση) για τη πλήρη κάλυψη της περιοχής χρειάζονται 5 σταθμοί βάσης (BSC1&2), ενώ για να υπάρχει πλήρης κάλυψη της περιοχής ακόμα και σε λειτουργία έκτακτης ανάγκης απαιτείται το σύνολο των 12 σταθμών βάσης των δύο λύσεων BSC1 και BSC2. Όμοια, για τη δεύτερη περίπτωση (χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με σκίαση), για να υπάρχει απλά κάλυψη στη περιοχή απαιτούνται μόνο οι 5 σταθμοί βάσης της λύσης BSC1&2, ενώ για να υπάρχει πλήρης κάλυψη της περιοχής ακόμα και σε λειτουργία έκτακτης ανάγκης απαιτείται το σύνολο των 9 σταθμών βάσης των δύο λύσεων BSC1 και BSC2.

Στη τελευταία περίπτωση που υπολογίζεται και το μοντέλο χωρητικότητας χρειάζονται 13 σταθμοί βάσης για τη πλήρη ραδιοκάλυψη αλλά και για την κάλυψη της κίνησης της περιοχής. Ο αριθμός των σταθμών βάσης με το μοντέλο χωρητικότητας είναι περισσότερος τόσο σε σχέση με τη λύση BSC1&2 όσο και σε σχέση με το σύνολο των σταθμών βάσης των δύο λύσεων BSC1 και BSC2, χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας.

## Συμπεράσματα

Η εκπόνηση αυτής της πτυχιακής εργασίας έγινε στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Προηγμένα Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα και Δίκτυα» του τμήματος Επιστήμης και Τεχνολογίας Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου. Αντικείμενο της εργασίας είναι η αυτοματοποιημένη τοποθέτηση σταθμών βάσης για τη βέλτιστη ραδιοκάλυψη στο ασύρματο δίκτυο GSM-R κατά μήκος του βασικού ελληνικού σιδηροδρομικού άξονα με το μικρότερο κόστος, δηλαδή τον ελάχιστο δυνατό αριθμό σταθμών βάσης (base stations).

Εξετάστηκαν δύο αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, ο Συνδυαστικός Αλγόριθμος για Ολική Βελτιστοποίηση ή Combination Algorithm for Total Optimization (CAT) και ο Άπληστος Αλγόριθμος ή Greedy Algorithm (GR). Και οι δύο αλγόριθμοι προσομοιώθηκαν σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab. Αρχικά εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος CAT και στη συνέχεια ο αλγόριθμος GR εφαρμόστηκε στην λύση που δίνει ο αλγόριθμος CAT με σκοπό την μείωση ακόμα περισσότερο του αριθμού σταθμών βάσης, λαμβάνοντας υπόψη ή όχι τις απώλειες σκίασης και το μοντέλο χωρητικότητας για όλους τους πιθανούς σταθμούς βάσης και για όσους αντιστοιχούν στα δύο διαφορετικά BSC.

Αρχικά προσδιορίστηκε ο αριθμός των επαναλήψεων εκτέλεσης του αλγορίθμου CAT. Δεδομένου ότι ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται μέχρι ο αριθμός των σταθμών βάσης να μην μπορεί να μειωθεί περαιτέρω και αφού σε κάθε επανάληψη δημιουργούνται ομάδες τυχαία που περιέχουν διαφορετικούς σταθμούς βάσης, θα πρέπει να βρεθεί ο κατάλληλος αριθμός των επαναλήψεων εκτέλεσης του αλγορίθμου CAT. Ο αλγόριθμος εκτελέστηκε διαδοχικά με διαφορετικής τάξης αριθμό επαναλήψεων 10, 100, 1000, 10000 κλπ, λαμβάνοντας υπόψη ή όχι το μοντέλο χωρητικότητας και τις απώλειες σκίασης. Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του αλγορίθμου για ένα τυπικό σενάριο 10 ομάδων σταθμών βάσης και για την σιδηροδρομική γραμμή Κιάτο – ΣΚΑ – Αεροδρόμιο, στην οποία έχουν τοποθετηθεί αρχικά 21 σταθμοί βάσης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στη περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες λόγω σκίασης, η λαμβανόμενη ισχύς σε κάθε σημείο ελέγχου είναι ουσιαστικά μια τυχαία μεταβλητή που εξαρτάται από τον αριθμό και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των σκεδαστών που συμμετέχουν στη διάδοση, αφού η σκίαση ακολουθεί κανονική (Gaussian) λογαριθμική κατανομή. Λόγω αυτής της τυχαιότητας, θα μπορούσε να μην υπάρχει σύγκλιση ως προς τις επαναλήψεις. Αυτή η τυχαιότητα παρατηρείται στη δεύτερη περίπτωση "χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, με απώλειες σκίασης", παρόλα αυτά υπάρχει σύγκλιση. Από όλα τα αποτελέσματα βγαίνει το συμπέρασμα ότι υπάρχει σύγκλιση για όλες τις περιπτώσεις. Επομένως, η καλύτερη επιλογή είναι ο αλγόριθμος CAT να εκτελείται για 100000 επαναλήψεις για όλες τις

περιπτώσεις, αφού με σημαντικά μικρότερο χρόνο υπολογισμού, η λύση είναι πολύ κοντά στη βέλτιστη.

Αριθμός επαναλήψεων	Σταθμοί Βάσης			
	χωρίς μοντέλο χωρητικότητας χωρίς σκίαση	χωρίς μοντέλο χωρητικότητας με σκίαση	με μοντέλο χωρητικότητας χωρίς σκίαση	με μοντέλο χωρητικότητας με σκίαση
10	18	20	19	19
100	16	19	17	19
1000	16	19	17	19
10000	15	17	17	18
100000	15	19	17	18
200000	15	18	17	18
300000	15	18	17	18
400000	15	18	17	18
500000	15	18	17	18
1000000	15	18	17	18
1500000	15	18	17	18
2000000	15	18	17	18

Στη συνέχεια εξετάστηκαν τα αποτελέσματα του αλγορίθμου CAT για διαφορετικό αριθμό ομάδων σταθμών βάσης. Ο αλγόριθμος εκτελείται διαδοχικά για 2, 3, 5, 7, 10, 15 και 21 ομάδες σταθμών βάσης, για 100000 επαναλήψεις για όλα τα σενάρια. Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται στην περιοχή Κιάτο – ΣΚΑ – Αεροδρόμιο, όπου έχουν τοποθετηθεί αρχικά 21 σταθμοί βάσης.

Αριθμός ομάδων σταθμών βάσης	Σταθμοί Βάσης			
	χωρίς μοντέλο χωρητικότητας χωρίς σκίαση	χωρίς μοντέλο χωρητικότητας με σκίαση	με μοντέλο χωρητικότητας χωρίς σκίαση	με μοντέλο χωρητικότητας με σκίαση
2	8	9	17	17
3	9	11	17	17
5	11	14	17	17
7	13	16	17	17
10	14	20	17	18
15	16	17	17	17
21	21	21	21	21

Παρατηρήθηκε ότι αν κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου CAT ληφθεί υπόψη το μοντέλο χωρητικότητας και οι ομάδες των σταθμών βάσης είναι λιγότερες από 7, ο αλγόριθμος συγκλίνει και η βέλτιστη λύση σταθεροποιείται στους 17 σταθμούς

βάσης. Αυτό συμβαίνει επειδή οι συνολικές απαιτήσεις κίνησης της περιοχής προϋποθέτουν την ύπαρξη τουλάχιστο ενός συγκεκριμένου αριθμού σταθμών βάσης για την κάλυψή της.

Επιπλέον, αν και παρατηρήθηκε ότι κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου χωρίς να συμπεριλαμβάνεται το μοντέλο χωρητικότητας, όσο μειώνεται ο αριθμός των ομάδων σταθμών βάσης τόσο μειώνεται παράλληλα και ο αριθμός των σταθμών βάσης της τελικής λύσης, συγχρόνως αυξάνεται ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Αυτό σημαίνει ότι ενώ η επιλογή των 2 ομάδων σταθμών βάσης δίνει τη βέλτιστη λύση, από την άποψη της υπολογιστικής πολυπλοκότητας καλύτερη επιλογή είναι οι 3 ομάδες, αφού με σημαντικά μικρότερο χρόνο υπολογισμού η λύση είναι πολύ κοντά στη βέλτιστη. Επιπλέον, ο GR αλγόριθμος μπορεί να εφαρμοστεί σε αυτή τη λύση του CAT αλγόριθμου για τη βελτιστοποίησή της, με μικρότερο συνολικό χρόνο επεξεργασίας. Από την παραπάνω ανάλυση, καταλήξαμε στην επιλογή 3 ομάδων σταθμών βάσης για την εκτέλεση του CAT αλγόριθμου για όλες τις περιπτώσεις.

Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν και οι δύο αλγόριθμοι σε όλες τις περιοχές και για όλα τα πιθανά σενάρια. Για την εκτέλεση του CAT αλγόριθμου επιλέχθηκαν 100000 επαναλήψεις και 3 ομάδες σταθμών βάσης. Όλα τα αποτελέσματα για τις 4 περιοχές φαίνονται στους παρακάτω πίνακες. Η πρώτη γραμμή περιλαμβάνει τη λύση για τους δύο αλγόριθμους που εφαρμόζονται σε όλους τους πιθανούς σταθμούς βάσης. Οι επόμενες δύο γραμμές περιλαμβάνουν τη λύση για τις περιπτώσεις λειτουργίας έκτακτης ανάγκης.

⇒ Κιάτο – ΣΚΑ – Αεροδρόμιο Αθηνών

Αρχικοί σταθμοί βάσης	Σταθμοί Βάσης (CAT/GR)			
	χωρίς μοντέλο χωρητικότητας χωρίς σκίαση	χωρίς μοντέλο χωρητικότητας με σκίαση	με μοντέλο χωρητικότητας χωρίς σκίαση	με μοντέλο χωρητικότητας με σκίαση
21 (BSC1&2)	9/7	10/8	17/7	17/10
11 (BSC1)	7/6	9/8		
10 (BSC2)	7/7	8/8		

⇒ Πειραιάς – Αθήνα – Τιθορέα

Αρχικοί σταθμοί βάσης	Σταθμοί Βάσης (CAT/GR)			
	χωρίς μοντέλο χωρητικότητας χωρίς σκίαση	χωρίς μοντέλο χωρητικότητας με σκίαση	με μοντέλο χωρητικότητας χωρίς σκίαση	με μοντέλο χωρητικότητας με σκίαση
26 (BSC1&2)	10/7	12/7	20/6	20/9
13 (BSC1)	7/7	10/8		
13 (BSC2)	8/6	10/10		

⇒ Δομοκός – Λάρισα – Θεσσαλονίκη

Αρχικοί σταθμοί βάσης	Σταθμοί Βάσης (CAT/GR)			
	χωρίς μοντέλο χωρητικότητας χωρίς σκίαση	χωρίς μοντέλο χωρητικότητας με σκίαση	με μοντέλο χωρητικότητας χωρίς σκίαση	με μοντέλο χωρητικότητας με σκίαση
30 (BSC1&2)	13/9	15/10	20/9	20/12
15 (BSC1)	9/9	10/9		
15 (BSC2)	10/10	11/11		

⇒ Θεσσαλονίκη - Προμαχώνας

Αρχικοί σταθμοί βάσης	Σταθμοί Βάσης (CAT/GR)			
	χωρίς μοντέλο χωρητικότητας χωρίς σκίαση	χωρίς μοντέλο χωρητικότητας με σκίαση	με μοντέλο χωρητικότητας χωρίς σκίαση	με μοντέλο χωρητικότητας με σκίαση
18 (BSC1&2)	7/5	9/5	13/6	13/5
9 (BSC1)	6/6	6/5		
9 (BSC2)	6/6	7/4		

Με μια γρήγορη ματιά στους πίνακες αποτελεσμάτων παρατηρούμε ότι όταν το πρόγραμμα εκτελείται χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας, η λύση του CAT αλγορίθμου και η λύση του GR αλγορίθμου είτε είναι ίδιες είτε διαφέρουν κατά λίγους σταθμούς βάσης. Όταν το πρόγραμμα εκτελείται με το μοντέλο χωρητικότητας υπάρχει σημαντική διαφορά στις λύσεις των δύο αλγορίθμων. Ο αλγόριθμος CAT υπολογίζει με βάση τις απαιτήσεις κίνησης τον αριθμό των σταθμών βάσης, ενώ ο αλγόριθμος GR υπολογίζει, με βάση τη CAT λύση, απλά την κάλυψη των σημείων ελέγχου.

Επιπλέον, στη περίπτωση χωρίς το μοντέλο χωρητικότητας για να υπάρχει απλά κάλυψη στη περιοχή απαιτούνται μόνο οι σταθμοί βάσης της λύσης BSC1&2. Όμως, για να υπάρχει πλήρης κάλυψη της περιοχής ακόμα και σε λειτουργία έκτακτης ανάγκης απαιτείται το σύνολο των σταθμών βάσης των δύο λύσεων BSC1 και BSC2.

Στη τελευταία περίπτωση που υπολογίζεται και το μοντέλο χωρητικότητας παρατηρούμε ότι η σκίαση δεν παίζει ρόλο στον αριθμό των σταθμών βάσης, αφού ο αριθμός των σταθμών βάσης είναι ίδιος είτε συνυπολογίζονται οι απώλειες σκίασης είτε όχι. Επιπλέον οι σταθμοί βάσης που απαιτούνται είναι πάντα περισσότεροι και από την αντίστοιχη λύση BSC1&2 και από το σύνολο των σταθμών βάσης των δύο λύσεων BSC1 και BSC2.



## Βιβλιογραφία

- [1] A. Molina, G. E. Athanasiadou and A. R. Nix, *“The Automatic Location of Base-Stations for optimized cellular coverage: A new combinatorial Approach”*, IEEE VTC '99, pp. 606-610, Texas, USA, 16-19 May 1999
- [2] A. Molina, A. R. Nix , G. E. Athanasiadou, *“Cellular network capacity planning using the combination algorithm for total optimisation”*, IEEE VTC 2000 , Tokyo, Japan, May 2000
- [3] P. Calegari, F. Guidec, P. Kuonen, B. Chamaret, S. Ubeda, S. Josselin, D. Wagner, M. Pizarroso, *“Radio Network Planning with Combinatorial Optimisation Algorithms”*, ACTS Mobile Telecommunications Summit 96
- [4] K. Kedem, I. Rabaev, N. Sokolovsky, *“Algorithms for Placing and Connecting Facilities and their Comparative Analysis”*
- [5] A. Molina , A. R. Nix, G. E. Athanasiadou, *“The effects of control node density in cellular network planning using the combination algorithm for total optimization (CAT)”*, IEEE PIMRC 2000 , London, UK, September 2000
- [6] P. Calegari, F. Guidec, P. Kuonen, F. Nielsen, *“Combinatorial optimization algorithms for radio network planning”*, Volume 263, Issues 1-2, Pages 235-245, 28 July 2001
- [7] R. Menolascino, M. Pizarroso, *“STORMS Project Final Report”*, AC016, Software Tools for the Optimisation of Resources in Mobile Systems, April 1999
- [8] Α. Κανάτας, Φ. Κωνσταντίνου, Γ. Πάντος, *“Συστήματα κινητών επικοινωνιών”*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου
- [9] Μ. Ε. Θεολόγου, *“Δίκτυα κινητών και προσωπικών επικοινωνιών”*, Εκδόσεις Τζιόλα

Διευθύνσεις στο διαδίκτυο

- [10] <http://www.uic.org/spip.php?rubrique847>  
ERTMS/GSM-R Specifications, UIC (International Union of Railways)
- [11] <http://en.wikipedia.org/wiki/GSM-R>  
GSM-R, Wikipedia Free Encyclopedia

## Παράρτημα

Παρακάτω παρατίθεται ολόκληρος ο κώδικας σε Matlab R2009b. Εκτός από τα βασικά Toolboxes του Matlab χρησιμοποιήθηκε το Mapping Toolbox για την ανάλυση και απεικόνιση της γεωγραφικής πληροφορίας. Ο κώδικας έχει διαρθρωθεί σε συναρτήσεις, μία σε κάθε αρχείο, και ένα κύριο script αρχείο (main.m) το οποίο καλεί όλες τις συναρτήσεις.

### Π.1 Κύριο script αρχείο "main.m"

```
clear;
close all;
clc;

% Initialisations
NUM_OF_AREAS = 4; % Number of Areas of the Railway Network
disp(['>> The algorithms run for ', num2str(NUM_OF_AREAS), ' areas <<']);

% Number of Groups of BSs
%NUM_OF_GRP = 3;
NUM_OF_GRP = str2double(input('Give the number of groups of BSs: ','s'));

% Number of Iterations of CAT algorithm
%NUM_OF_ITER = 100000;
NUM_OF_ITER = str2double(input('Give the number of iterations of CAT: ','s'));

% Capacity Module for CAT algorithm
CAPMOD = strcmp(input('Capacity Module for CAT (yes/no)? ','s'), 'yes');

% Shadow Fading
SHADOW = strcmp(input('Shadow fading (yes/no)? ','s'), 'yes');

% BSC=0 -> all the BS
% BSC=1 -> only BS of BCS1
% BSC=2 -> only BS of BSC2
BSC = 0;

% Location of BSs and CNs
base_stations;
control_nodes;

grlat=[37.8 38.3;
       37.9 38.7;
       39.1 40.8;
       40.5 41.5];
grlon=[22.6 24.0;
       22.7 23.9;
       21.7 23.7;
       22.7 23.5];
```

```

for area = 1:NUM_OF_AREAS
    fprintf('\n');
    disp(['***** Area ', num2str(area), ' *****']);

    % Parse bs & cn data of the area
    if BSC == 1
        bs = all_bs(all_bs(:,3) == area & all_bs(:,6) == 1, :);
    elseif BSC == 2
        bs = all_bs(all_bs(:,3) == area & all_bs(:,6) == 2, :);
    else
        bs = all_bs(all_bs(:,3) == area, :);
    end

    cn = all_cn(all_cn(:,3) == area, :);
    NUM_OF_BS = size(bs,1);
    NUM_OF_CN = size(cn,1);

    disp(['Total Number of base stations: ', num2str(NUM_OF_BS)]);

    % Plot map of area
    figure(area);
    worldmap(grlat(area,:), grlon(area,:));
    land=shaperead('landareas.shp', 'UseGeoCoords', true);
    geoshow(land, 'FaceColor', [0.15 0.5 0.15]);

    % Plot base stations
    for i = 1:NUM_OF_BS
        plotm(bs(i,1), bs(i,2), 'r+');
    end

    % Plot control nodes
    for i = 1:NUM_OF_CN
        plotm(cn(i,1), cn(i,2), 'bo');
    end

    % Coverage according to propagation model
    [cover, pl, d] = coverage(bs, cn, SHADOW);

    % Capacity maximum for area
    capmax = sum(cn(:,6),1);

    % Plot Number of CNs covered per group of BSs
    if area == 1
        bscomb(cover);
    end

    % Run CAT for a number of iterations
    total_num_best_sol = [];
    iter = 1;
    while (iter <= NUM_OF_ITER)
        [best_sol, num_best_sol] = catalgorithm(cover, NUM_OF_GRP);
        for i=1:size(num_best_sol, 1)
            total_num_best_sol(i, iter) = num_best_sol(i);
        end
        if rem(iter, 10000) == 0

```

```

        disp(['Iteration: ', num2str(iter)]);
    end
    iter = iter + 1;
end

% Capacity Module
cap_cs = zeros(NUM_OF_ITER, 1);
if CAPMOD == 1
    for iter = 1:NUM_OF_ITER
        for i = 1:size(total_num_best_sol, 1)
            if find(total_num_best_sol(i, iter)) ~= 0
                cap_cs(iter) = cap_cs(iter) + bs(total_num_best_sol(i, iter), 5);
            end
        end
    end
else
    cap_cs(1:NUM_OF_ITER,1) = capmax;
end

% Select solution with coverage and capacity module
min = NUM_OF_BS;
cat_solution = 0;
for iter = 1:NUM_OF_ITER
    if cap_cs(iter) >= capmax
        if size(find(total_num_best_sol(:,iter)>0), 1) <= min
            min = size(find(total_num_best_sol(:,iter)>0), 1);
            cat_solution = total_num_best_sol(:,iter);
        end
    end
    if cat_solution == 0
        disp(['BS capacity of area ', num2str(area), ' is too small!']);
        continue;
    end
end

% Plot CAT solution
figure(area); hold on;
cs = 0;
for i = 1:size(cat_solution, 1)
    if find(cat_solution(i)) ~= 0
        cs = cs + 1;
        plotm(bs(cat_solution(i),1), bs(cat_solution(i),2), 'yd');
    end
end
disp(['CAT solution: ', num2str(cs), ' base stations!']);

pause;

% Run Greedy Algorithm
greedy_solution = greedy(cat_solution, cover, NUM_OF_CN);

% Plot Greedy solution
figure(area); hold on;
gs = 0;
for i = 1:size(greedy_solution, 1)
    if find(greedy_solution(i)) ~= 0
        gs = gs + 1;
    end
end

```

```

        plotm(bs(greedy_solution(i),1), bs(greedy_solution(i),2), 'kd');
    end
end
disp(['Greedy solution: ', num2str(gs), ' base stations']);
end

```

## Π.2 Αρχείο δεδομένων σταθμών βάσης "base\_stations.m"

```

% Location of Base Stations
% bs = [Lat Lon Area EIRP Capacity(Erlang) BSC]

% Area 1 > KIATO-SKA-AIRPORT
% Area 2 > PIREAS-SKA-TITHOREA
% Area 3 > DOMOKOS-THESSALONIKI
% Area 4 > THESSALONIKI-PROMACHONAS

all_bs = [
38.013808 22.735119 1 59.6 5.8760 1;
37.932611 22.788805 1 56.2 5.8760 2;
37.921850 22.931417 1 63.3 11.7520 1;
37.923372 23.094428 1 62.6 5.8760 2;
37.932853 23.136844 1 59.7 5.8760 1;
37.978469 23.267017 1 62.8 5.8760 2;
37.975050 23.317892 1 59.0 5.8760 1;
38.013086 23.414333 1 56.4 5.8760 2;
38.029603 23.470000 1 59.0 5.8760 1;
38.038003 23.491258 1 59.0 5.8760 2;
38.074833 23.530419 1 56.4 5.8760 1;
38.079694 23.607028 1 53.2 17.7974 2;
38.081969 23.663947 1 58.8 5.8760 1;
38.074611 23.669278 1 59.0 5.8760 2;
38.068903 23.737619 1 56.2 17.7974 1;
38.044389 23.795611 1 55.7 5.8760 2;
38.032806 23.822731 1 55.7 5.8760 1;
38.024417 23.834806 1 62.8 5.8760 2;
37.983406 23.869825 1 56.4 5.8760 1;
37.912403 23.896192 1 56.4 5.8760 2;
37.936831 23.944556 1 60.6 5.8760 1;
37.949388 23.642527 2 59.6 5.8760 1;
37.960861 23.665083 2 59.6 11.7520 2;
37.994027 23.721083 2 59.6 11.7520 1;
38.029022 23.718136 2 56.4 5.8760 2;
38.068903 23.737619 2 56.2 17.7974 1;
38.080075 23.744286 2 56.4 5.8760 2;
38.123717 23.832633 2 60.4 5.8760 1;
38.139472 23.858389 2 56.8 5.8760 2;
38.188114 23.844881 2 60.4 5.8760 1;
38.203361 23.851861 2 56.6 5.8760 2;
38.229083 23.837667 2 56.4 5.8760 1;
38.235450 23.785575 2 56.4 5.8760 2;
38.249578 23.695892 2 56.4 5.8760 1;
38.323472 23.608444 2 60.2 5.8760 2;
38.361278 23.518397 2 56.4 5.8760 1;
38.372761 23.471142 2 56.4 5.8760 2;
38.367861 23.382806 2 56.4 5.8760 1;

```

38.329744 23.319369 2 56.4 5.8760 2;  
38.330778 23.260028 2 56.4 5.8760 1;  
38.365069 23.164469 2 63.2 5.8760 2;  
38.373028 23.150972 2 62.8 5.8760 1;  
38.393083 23.004111 2 56.2 5.8760 2;  
38.471833 22.926806 2 56.4 5.8760 1;  
38.534322 22.811939 2 56.4 5.8760 2;  
38.560097 22.792094 2 56.4 5.8760 1;  
38.607775 22.718242 2 63.6 5.8760 2;  
39.179111 22.286556 3 59.8 5.8760 1;  
39.240000 22.267000 3 56.4 5.8760 2;  
39.311639 22.243750 3 59.6 11.7520 1;  
39.416922 22.231858 3 59.0 5.8760 2;  
39.428044 22.239839 3 59.0 5.8760 1;  
39.464672 22.282500 3 56.0 5.8760 2;  
39.513411 22.336328 3 59.5 11.7520 1;  
39.601125 22.394264 3 56.2 5.8760 2;  
39.629931 22.425356 3 63.5 11.7520 1;  
39.703150 22.459694 3 56.4 5.8760 2;  
39.785111 22.492639 3 56.4 5.8760 1;  
39.852486 22.518369 3 56.2 5.8760 2;  
39.874056 22.548389 3 59.0 5.8760 1;  
39.899667 22.615192 3 59.0 5.8760 2;  
39.950389 22.660694 3 56.4 5.8760 1;  
39.972383 22.645367 3 59.0 5.8760 2;  
40.009775 22.592450 3 62.8 5.8760 1;  
40.058583 22.565806 3 56.4 5.8760 2;  
40.124278 22.550639 3 56.4 5.8760 1;  
40.226328 22.541294 3 56.4 5.8760 2;  
40.266989 22.530906 3 56.2 5.8760 1;  
40.316750 22.578000 3 56.4 5.8760 2;  
40.379186 22.613881 3 56.4 5.8760 1;  
40.443714 22.585108 3 62.8 5.8760 2;  
40.450617 22.577219 3 62.8 5.8760 1;  
40.491881 22.559133 3 60.4 5.8760 2;  
40.636797 22.530428 3 56.4 5.8760 1;  
40.673750 22.601583 3 56.4 5.8760 2;  
40.674475 22.803811 3 56.2 5.8760 1;  
40.654994 22.910150 3 54.8 17.7974 2;  
40.654994 22.910150 4 54.8 17.7974 2;  
40.688314 22.850228 4 60.4 5.8760 1;  
40.748539 22.831092 4 60.4 5.8760 2;  
40.777867 22.825486 4 60.0 5.8760 1;  
40.860558 22.886436 4 60.4 5.8760 2;  
40.922700 22.874614 4 60.0 5.8760 1;  
40.974828 22.841994 4 56.4 5.8760 2;  
41.085861 22.784761 4 60.0 5.8760 1;  
41.110494 22.782836 4 56.4 5.8760 2;  
41.234336 22.819139 4 60.2 5.8760 1;  
41.261078 22.839214 4 56.4 5.8760 2;  
41.279936 22.928697 4 60.2 5.8760 1;  
41.248353 23.041944 4 56.2 5.8760 2;  
41.261606 23.192686 4 56.2 5.8760 1;  
41.272511 23.323747 4 60.4 5.8760 2;  
41.281747 23.329750 4 55.8 5.8760 1;  
41.337247 23.347608 4 60.4 5.8760 2;  
41.359417 23.354056 4 63.5 5.8760 1];

### Π.3 Αρχείο δεδομένων σημείων ελέγχου "control\_nodes.m"

```
% Location of Control Nodes
%
% cn = [Lat Lon Area Model Tunnel_Length Capacity(Erlang)]
% Model > 1:Open, 2:Urban, 3:Tunnel
% Tunnel_Length in km
% Control Nodes are located in the center of a tunnel

% Area 1 > KIATO-SKA-AIRPORT
% Area 2 > PIREAS-SKA-TITHOREA
% Area 3 > DOMOKOS-THESSALONIKI
% Area 4 > THESSALONIKI-PROMACHONAS

all_cn = [
37.991111 22.745833 1 1 0 2.88;
37.964167 22.749444 1 1 0 1.92;
37.941111 22.767778 1 1 0 1.92;
37.928056 22.799722 1 1 0 1.92;
37.914800 22.830556 1 1 0 1.92;
37.910556 22.866667 1 1 0 1.92;
37.918611 22.901667 1 1 0 1.92;
37.922222 22.941111 1 1 0 6.80;
37.919722 22.973889 1 1 0 1.92;
37.926389 23.006944 1 1 0 1.92;
37.928056 23.041111 1 1 0 1.92;
37.927222 23.071389 1 1 0 1.92;
37.921228 23.107094 1 3 2 1.92;
37.935786 23.141197 1 1 0 2.88;
37.950775 23.169858 1 1 0 1.92;
37.964711 23.199914 1 1 0 1.92;
37.974281 23.228464 1 1 0 1.92;
37.977594 23.262389 1 2 0 1.92;
37.975569 23.287775 1 3 4 1.92;
37.976019 23.319625 1 2 0 1.92;
37.985161 23.352028 1 1 0 1.92;
38.002025 23.378783 1 1 0 1.92;
38.011642 23.410700 1 1 0 2.88;
38.024722 23.440631 1 1 0 1.92;
38.032083 23.485042 1 3 2 1.92;
38.052797 23.507017 1 1 0 1.92;
38.070258 23.526631 1 1 0 2.88;
38.089808 23.550247 1 1 0 1.92;
38.093433 23.580044 1 2 0 1.92;
38.076397 23.613739 1 2 0 6.80;
38.086058 23.643939 1 1 0 1.92;
38.078497 23.666578 1 3 1 1.92;
38.071964 23.699883 1 2 0 2.88;
38.066739 23.733053 1 2 0 6.80;
38.064536 23.741792 1 2 0 1.92;
38.059950 23.757483 1 2 0 1.92;
38.056067 23.773869 1 2 0 1.92;
38.047675 23.787339 1 2 0 2.88;
38.042078 23.803419 1 2 0 1.92;
38.036139 23.818786 1 2 0 1.92;
38.029953 23.825903 1 3 1 2.88;
```

38.023247 23.839444 1 2 0 2.88;  
38.020981 23.856347 1 2 0 1.92;  
38.012264 23.867964 1 2 0 1.92;  
37.994850 23.872681 1 2 0 1.92;  
37.976747 23.873322 1 2 0 2.88;  
37.956922 23.886231 1 2 0 1.92;  
37.930942 23.886653 1 2 0 1.92;  
37.908575 23.900731 1 2 0 2.88;  
37.914989 23.922231 1 2 0 1.92;  
37.925189 23.933342 1 2 0 1.92;  
37.938325 23.945961 1 2 0 2.88;  
37.952697 23.650897 2 2 0 2.88;  
37.958303 23.656028 2 2 0 6.80;  
37.965681 23.682050 2 2 0 1.92;  
37.970003 23.698169 2 2 0 1.92;  
37.979375 23.710281 2 2 0 1.92;  
37.986464 23.717297 2 2 0 6.80;  
38.006836 23.721308 2 2 0 1.92;  
38.016483 23.718208 2 2 0 2.88;  
38.037758 23.726669 2 2 0 1.92;  
38.048828 23.731406 2 2 0 1.92;  
38.062006 23.735075 2 2 0 6.80;  
38.078256 23.736414 2 2 0 2.88;  
38.081811 23.752506 2 2 0 1.92;  
38.090056 23.766103 2 2 0 1.92;  
38.106978 23.792683 2 2 0 1.92;  
38.119378 23.823156 2 2 0 1.92;  
38.132864 23.852828 2 2 0 2.88;  
38.156989 23.869594 2 2 0 1.92;  
38.178922 23.849536 2 1 0 2.88;  
38.205628 23.853222 2 1 0 1.92;  
38.226300 23.847892 2 1 0 2.88;  
38.227411 23.813550 2 1 0 1.92;  
38.235706 23.780778 2 1 0 2.88;  
38.237556 23.746639 2 1 0 1.92;  
38.243775 23.713294 2 1 0 1.92;  
38.254442 23.681778 2 1 0 2.88;  
38.279333 23.668508 2 1 0 1.92;  
38.299442 23.645731 2 1 0 1.92;  
38.316769 23.619756 2 1 0 2.88;  
38.333697 23.592975 2 1 0 1.92;  
38.346192 23.562561 2 1 0 1.92;  
38.357297 23.530531 2 1 0 1.92;  
38.363539 23.496239 2 1 0 1.92;  
38.374272 23.465403 2 1 0 2.88;  
38.374219 23.430706 2 1 0 1.92;  
38.368314 23.384436 2 1 0 2.88;  
38.351756 23.357061 2 1 0 1.92;  
38.333317 23.327389 2 1 0 2.88;  
38.329697 23.296272 2 1 0 1.92;  
38.331075 23.258100 2 1 0 1.92;  
38.345631 23.223131 2 1 0 1.92;  
38.358225 23.193242 2 1 0 1.92;  
38.368311 23.158089 2 3 1.4 1.92;  
38.377639 23.125628 2 1 0 1.92;  
38.381747 23.087600 2 1 0 1.92;  
38.381269 23.052767 2 1 0 1.92;



38.389069 23.012983 2 1 0 1.92;  
38.407917 22.982606 2 1 0 1.92;  
38.428331 22.954181 2 1 0 1.92;  
38.452386 22.936844 2 1 0 1.92;  
38.480883 22.919989 2 1 0 2.88;  
38.496011 22.887075 2 1 0 1.92;  
38.510889 22.851758 2 1 0 1.92;  
38.526772 22.821728 2 1 0 2.88;  
38.549864 22.800619 2 1 0 1.92;  
38.568986 22.773608 2 1 0 1.92;  
38.585053 22.745872 2 1 0 1.92;  
38.612625 22.712794 2 1 0 2.88;  
39.214303 22.275528 3 1 0 2.88;  
39.249256 22.264261 3 1 0 1.92;  
39.279769 22.254500 3 1 0 1.92;  
39.306011 22.246097 3 1 0 6.80;  
39.340919 22.234797 3 1 0 1.92;  
39.376042 22.223761 3 1 0 1.92;  
39.422097 22.235561 3 3 1 1.92;  
39.449628 22.265711 3 1 0 1.92;  
39.476419 22.297697 3 1 0 2.88;  
39.504236 22.326967 3 1 0 1.92;  
39.532703 22.356219 3 1 0 1.92;  
39.552753 22.380386 3 1 0 1.92;  
39.569231 22.402978 3 1 0 1.92;  
39.604558 22.396178 3 2 0 1.92;  
39.626725 22.416450 3 2 0 1.92;  
39.634003 22.431719 3 2 0 6.80;  
39.657808 22.440447 3 2 0 1.92;  
39.680969 22.453056 3 2 0 1.92;  
39.716389 22.463628 3 1 0 1.92;  
39.751531 22.475733 3 1 0 1.92;  
39.774767 22.487647 3 1 0 1.92;  
39.807914 22.506511 3 1 0 1.92;  
39.836003 22.515058 3 1 0 1.92;  
39.854439 22.519694 3 1 0 1.92;  
39.869961 22.539131 3 1 0 1.92;  
39.885567 22.582422 3 3 6 1.92;  
39.904669 22.625100 3 1 0 2.88;  
39.931567 22.654969 3 1 0 1.92;  
39.962450 22.656533 3 1 0 1.92;  
39.980606 22.630089 3 1 0 2.88;  
39.996111 22.609278 3 3 4 1.92;  
40.023872 22.579525 3 1 0 1.92;  
40.048842 22.567531 3 1 0 2.88;  
40.085656 22.556233 3 1 0 1.92;  
40.112617 22.555267 3 1 0 2.88;  
40.149458 22.542572 3 1 0 1.92;  
40.184100 22.552033 3 1 0 1.92;  
40.210553 22.545731 3 1 0 1.92;  
40.245922 22.535706 3 1 0 1.92;  
40.275322 22.537072 3 2 0 2.88;  
40.303472 22.566872 3 1 0 2.88;  
40.333636 22.592553 3 1 0 1.92;  
40.365156 22.615403 3 1 0 1.92;  
40.398142 22.601772 3 1 0 1.92;  
40.429408 22.592261 3 1 0 1.92;

40.447608 22.580531 3 3 0.8 1.92;  
40.480372 22.568244 3 1 0 2.88;  
40.509936 22.542081 3 1 0 1.92;  
40.545422 22.532717 3 1 0 1.92;  
40.581347 22.529231 3 1 0 1.92;  
40.617692 22.525697 3 1 0 2.88;  
40.649692 22.550831 3 1 0 1.92;  
40.669122 22.587544 3 1 0 2.88;  
40.684050 22.630883 3 1 0 1.92;  
40.693833 22.676375 3 1 0 1.92;  
40.690747 22.723675 3 1 0 1.92;  
40.681156 22.769950 3 1 0 1.92;  
40.672044 22.816936 3 2 0 2.88;  
40.671614 22.859119 3 2 0 1.92;  
40.666181 22.890056 3 2 0 6.80;  
40.669336 22.884575 4 2 0 6.80;  
40.682469 22.861061 4 2 0 1.92;  
40.703975 22.837914 4 2 0 1.92;  
40.734244 22.834172 4 1 0 1.92;  
40.769853 22.827267 4 1 0 2.88;  
40.791342 22.840983 4 1 0 1.92;  
40.824778 22.858917 4 1 0 1.92;  
40.849386 22.871700 4 1 0 2.88;  
40.881722 22.892714 4 1 0 1.92;  
40.906092 22.880514 4 1 0 1.92;  
40.935564 22.865456 4 1 0 2.88;  
40.960919 22.856233 4 1 0 1.92;  
40.981958 22.824469 4 1 0 1.92;  
41.016997 22.804283 4 1 0 1.92;  
41.052231 22.794886 4 1 0 1.92;  
41.074528 22.791264 4 1 0 2.88;  
41.101025 22.783397 4 1 0 2.88;  
41.136906 22.781328 4 1 0 1.92;  
41.172594 22.772383 4 1 0 1.92;  
41.202372 22.789111 4 1 0 1.92;  
41.224333 22.809836 4 1 0 2.88;  
41.251767 22.834344 4 1 0 2.88;  
41.269422 22.873658 4 1 0 1.92;  
41.280917 22.905436 4 1 0 1.92;  
41.276900 22.953267 4 1 0 1.92;  
41.260150 22.994486 4 1 0 1.92;  
41.246183 23.016333 4 1 0 1.92;  
41.252353 23.063500 4 1 0 1.92;  
41.259175 23.110336 4 1 0 1.92;  
41.261086 23.158011 4 1 0 1.92;  
41.260692 23.206711 4 1 0 1.92;  
41.262267 23.254892 4 1 0 1.92;  
41.270525 23.301494 4 1 0 1.92;  
41.261900 23.345725 4 1 0 2.88;  
41.301250 23.332347 4 1 0 1.92;  
41.320567 23.348708 4 1 0 1.92;  
41.349564 23.349533 4 1 0 1.92;  
41.376956 23.362794 4 1 0 2.88];

#### Π.4 Αρχείο υπολογισμού ραδιοκάλυψης "coverage.m"

```
% Calculating coverage according to the propagation model
function [cover, pl, d] = coverage(bs, cn, shadowing)

% Propagation Equation: PathLoss = -(A + B*log(d))
% A: intercept, B: slope
% Open model: A(1), B(1)
% Urban model: A(2), B(2)
% Tunnel model: A(3), B(3)
A = [5.6 0.9 0.9];
B = [-34.6 -36.3 -36.3];
THRESHOLD = -84; % dB

% Free Space Loss: FSL = 20*log(4*pi*(1/lamda)*d)
c = 3 * 10^8; % m/sec
f = 9 * 10^8; % Hz
lamda = c/f;

% Shadow fading
mu = 0;
sigma = 7; % dB

% Tunnel Loss
FADING = 10; % Signal Strength Fluctuation (dB)
MARGIN = 10; % Tunnel Bend Loss (dB)

% Initializations
NUM_OF_BS = size(bs, 1);
NUM_OF_CN = size(cn, 1);
d = zeros(NUM_OF_BS, NUM_OF_CN);
pl = zeros(NUM_OF_BS, NUM_OF_CN);
cover = zeros(size(pl));

% Calculate path loss
for i = 1:NUM_OF_BS
    for j = 1:NUM_OF_CN
        % Distance in km between locations in (lat, lon)
        d(i,j) = haversine([bs(i,1) bs(i,2)], [cn(j,1) cn(j,2)]);
        % shadow fading (dB)
        if shadowing == 1
            Xs = normrnd(mu, sigma);
        else
            Xs = 0;
        end
        if cn(j,4) ~= 3
            pl(i,j) = -(A(cn(j,4)) + B(cn(j,4)) * log10(d(i,j) * 1000)) + Xs;
        else % Tunnel Model
            pl(i,j) = -(A(cn(j,4)) + B(cn(j,4)) * log10((d(i,j)-cn(j,5))/2) * 1000)) + Xs;
            pl(i,j) = pl(i,j) + 20*log10(4*pi*(1/lamda)*cn(j,5)/2) + FADING + MARGIN;
        end
    end
end
end
```

```

% Calculate coverage
for i = 1:NUM_OF_BS
    for j = 1:NUM_OF_CN
        if pl(i,j) <= bs(i,4) - THRESHOLD
            cover(i,j) = 1;
        else
            cover(i,j) = 0;
        end
    end
end
end

end % End of function

```

## Π.5 Αρχείο υπολογισμού απόστασης μεταξύ σημείων "haversine.m"

```

function [km nmi mi] = haversine(loc1, loc2)
% HAVERSINE Compute distance between locations using Haversine formula
% KM = HAVERSINE(LOC1, LOC2) returns the distance KM in km between locations
% LOC1 and LOC2 using the Haversine formula. LOC1 and LOC2 are latitude and
% longitude coordinates that can be expressed as either strings representing degrees,
% minutes, and seconds (suffixed with N/S/E/W), or numeric arrays representing
% decimal degrees (where negative indicates West/South).
% [KM, NMI, MI] = HAVERSINE(LOC1, LOC2) returns the computed distance in
% kilometers (KM), nautical miles (NMI), and miles (MI).
% Examples
%   haversine('53 08 50N, 001 50 58W', '52 12 16N, 000 08 26E') returns
%       170.2547
%   haversine([53.1472 -1.8494], '52 12.16N, 000 08.26E') returns
%       170.2508
%   haversine([53.1472 -1.8494], [52.2044 0.1406]) returns 170.2563
%
% Inputs
%   LOC must be either a string specifying the location in degrees,
%   minutes and seconds, or a 2-valued numeric array specifying the
%   location in decimal degrees. If providing a string, the latitude
%   and longitude must be separated by a comma.
%
% Notes
%   The Haversine formula is used to calculate the great-circle
%   distance between two points, which is the shortest distance over
%   the earth's surface.
%
%   This program was created using equations found on the website
%   http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html

% Created by Josiah Renfree
% May 27, 2010

%% Check user inputs

% If two inputs are given, display error
if ~isequal(nargin, 2)
    error('User must supply two location inputs')

```

```

% If two inputs are given, handle data
else

    locs = {loc1 loc2}; % Combine inputs to make checking easier

    % Cycle through to check both inputs
    for i = 1:length(locs)

        % Check inputs and convert to decimal if needed
        if ischar(locs{i})
            % Parse lat and long info from current input
            temp = regexp(locs{i}, ',', 'split');
            lat = temp{1}; lon = temp{2};
            clear temp
            locs{i} = []; % Remove string to make room for array

            % Obtain degrees, minutes, seconds, and hemisphere
            temp = regexp(lat, '(\d+)\D+(\d+)\D+(\d+)(\w?)', 'tokens');
            temp = temp{1};

            % Calculate latitude in decimal degrees
            locs{i}(1) = str2double(temp{1}) + str2double(temp{2})/60 + ...
                str2double(temp{3})/3600;

            % Make sure hemisphere was given
            if isempty(temp{4})
                error('No hemisphere given')
            end

            % If latitude is south, make decimal negative
            elseif strcmpi(temp{4}, 'S')
                locs{i}(1) = -locs{i}(1);
            end

            clear temp

            % Obtain degrees, minutes, seconds, and hemisphere
            temp = regexp(lon, '(\d+)\D+(\d+)\D+(\d+)(\w?)', 'tokens');
            temp = temp{1};

            % Calculate longitude in decimal degrees
            locs{i}(2) = str2double(temp{1}) + str2double(temp{2})/60 + ...
                str2double(temp{3})/3600;

            % Make sure hemisphere was given
            if isempty(temp{4})
                error('No hemisphere given')
            end

            % If longitude is west, make decimal negative
            elseif strcmpi(temp{4}, 'W')
                locs{i}(2) = -locs{i}(2);
            end

            clear temp lat lon
        end
    end
end
end
end

```

```

% Check that both cells are a 2-valued array
if any(cellfun(@(x) ~isequal(length(x),2), locs))
    error('Incorrect number of input coordinates')
end

% Convert all decimal degrees to radians
locs = cellfun(@deg2rad, locs, 'UniformOutput', 0);

%% Begin calculation

R = 6371; % Earth's radius in km
delta_lat = locs{2}{1} - locs{1}{1}; % difference in latitude
delta_lon = locs{2}{2} - locs{1}{2}; % difference in longitude
a = sin(delta_lat/2)^2 + cos(locs{1}{1}) * cos(locs{2}{1}) * ...
    sin(delta_lon/2)^2;
c = 2 * atan2(sqrt(a), sqrt(1-a));
km = R * c; % distance in km

%% Convert result to nautical miles and miles

nmi = km * 0.539956803; % nautical miles
mi = km * 0.621371192; % miles

```

## Π.6 Αρχείο υπολογισμού συνδυασμών σταθμών βάσης "bscomb.m"

```

% Number of Control Nodes covered per group of Base Stations
function bscomb(cover)

NUM_OF_BS = 10;
NUM_OF_CN = 26;

% Total Number of Combinations
ct = 0;
for g = 1:NUM_OF_BS
    ct = ct + factorial(NUM_OF_BS)/(factorial(g)*factorial(NUM_OF_BS - g));
end

B1 = zeros(ct, 1);

for j = 1:NUM_OF_BS
    a = combnk((1:NUM_OF_BS), j);
    if j == 1
        sa = size(a,1);
        for i = 1:sa
            B(i,1) = size(find(sum(cover(a(i,:),:),1)>0), 2);
        end
        B1 = B;
    else
        sa = size(a,1);
        G = ones(sa,1);
        for i = 1:sa
            sum1 = sum(cover(a(i,:),:),1);
            f1 = find(sum1 > 0);
        end
    end
end

```

```

        sf = size(f1,2);
        G(i,1) = sf;
    end
    B1 = [B1;G];
end
end

figure(5); hold on;
plot(B1, 'db-');
plot(0:ct, NUM_OF_CN, 'dr-');
title('Number of CNs covered per combination of BSs');
xlabel('Number of Combinations of Base Stations');
ylabel('Number of Control Nodes');

```

```
end % End of function
```

## Π.7 Αρχείο CAT αλγόριθμου "catalgorithm.m"

```

% Combination Algorithm for Total optimisation (CAT)
function [best_sol, num_best_sol] = catalgorithm(cover, num_of_grp)

NUM_OF_BS = size(cover,1);
ind = randperm(NUM_OF_BS); % Random permutation
best_sol = [];
num_best_sol = [];

if num_of_grp == 1
    cover_grp = cover(ind, :);
    [best_sol, num_best_sol] = oca(cover_grp, ind);
    num_best_sol = num_best_sol';
else
    n = floor(NUM_OF_BS/num_of_grp);
    a = 1;
    b = n;
    for i = 1:num_of_grp
        if i == num_of_grp
            b = NUM_OF_BS;
        end
        ind_grp = ind(1, a:b);
        cover_grp = cover(ind_grp, :);
        [best_sol_grp, num_best_sol_grp] = oca(cover_grp, ind_grp);
        best_sol = [best_sol; best_sol_grp];
        num_best_sol = [num_best_sol; num_best_sol_grp'];
        a = a + n;
        b = b + n;
    end
end

end % End of function

```

## Π.8 Αρχείο OCA αλγορίθμου "oca.m"

```
% Original Combination Algorithm
function [best_sol_grp, num_best_sol_grp] = oca(cover_grp, ind_grp)

g = size(cover_grp, 1);

for i = 1:g
    % Enumeration of combinations
    comb = combnk((1:g), i);
    for j = 1:size(comb,1)
        % Sum of covered control nodes per combination
        sum_cn = sum(cover_grp(comb(j,:),:), 1);
        % All the results
        % i: num of bs per combination
        % j: the exact combination
        res(i,j) = size((find(sum_cn > 0)), 2);
    end
end

% Search the maximum element of res(i,j)
max_val = res(1,1);
m = 1;
n = 1;
for i = 1:size(res,1)
    for j = 1:size(res,2)
        if res(i,j) > max_val
            max_val = res(i,j);
            m = i;
            n = j;
        end
    end
end

comb = combnk((1:g), m);
num_best_sol_grp = ind_grp(1,comb(n,:));
best_sol_grp = cover_grp(comb(n,:),:);

end % End of function
```

## Π.9 Αρχείο Greedy αλγόριθμου "greedy.m"

```
% Greedy Algorithm
function [greedy_solution] = greedy(cat_solution, cover, num_of_cn)

% Initialisations
cover_greedy_sol = zeros(size(cover(cat_solution>0, :)));
cover_cat_sol = cover(cat_solution(cat_solution>0, :), :);
s = size(cover_cat_sol, 1);
num_cn_covered = zeros(s,1);

% Number of CN covered per BS
for i = 1:s
```



```

    num_cn_covered(i) = size(find(cover_cat_sol(i,:)>0), 2);
end

% Greedy
for i = 1:s
    [~, ind] = max(num_cn_covered);
    if i == 1
        cover_greedy_sol(ind,:) = cover_cat_sol(ind,:);
    else
        for j = 1:num_of_cn
            if find(cover_greedy_sol(:,j)) ~= 0
                continue;
            else
                cover_greedy_sol(ind,j) = cover_cat_sol(ind,j);
            end
        end
    end
    % Zero num_cn_covered(ind) for the next iteration
    num_cn_covered(ind) = 0;
end

% Solution
for i = 1:s
    if find(cover_greedy_sol(i,:)>0) ~= 0
        greedy_solution(i,:) = cat_solution(i);
    end
end

end % End of function

```