



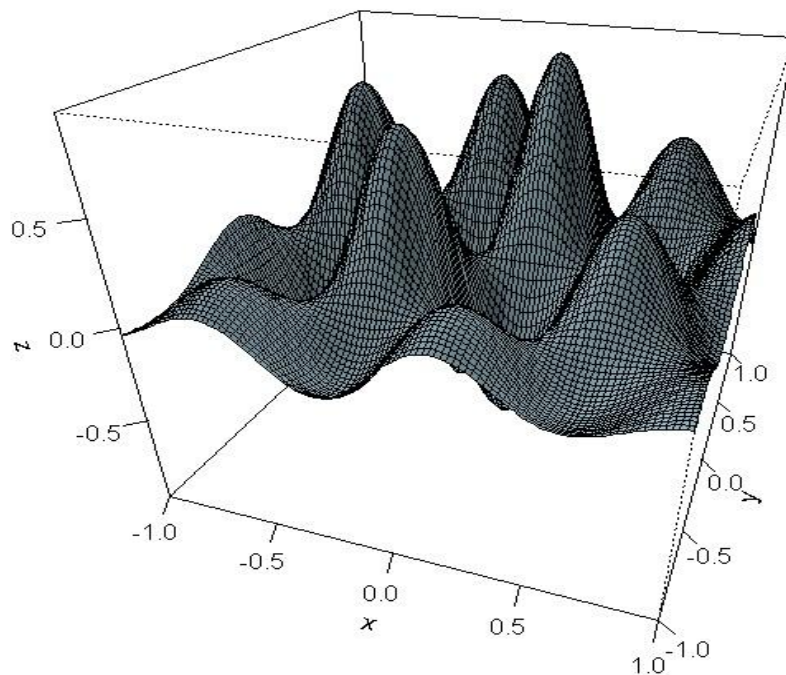
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΑΛΛΙΩΡΑ ΝΙΚΟΛΑΟΥ

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ ΔΟΜΙΚΟΥ ΙΣΤΟΥ ΜΙΑΣ
ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΣΕΙΣΜΙΚΟ ΣΥΜΒΑΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΜΕΤΑΕΥΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

$$\mathbf{HM} = \left[\begin{array}{ccc|c} x_1^1 & \dots & x_n^1 & f(\mathbf{x}^1) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ x_1^{hms} & \dots & x_n^{hms} & f(\mathbf{x}^{hms}) \end{array} \right]$$



Επιβλέπων:

Ν. Λαγάρος
Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, 2011

Η αντιμετώπισή ενός σεισμού και των επιπτώσεών του (μετασεισμική διαχείριση) διαδραματίζει πρωταρχικό ρόλο στην άμεση και αποτελεσματική επαναφορά των δραστηριοτήτων του αστικού χώρου. Πρώτο μέλημα της μετασεισμικής διαχείρισης αποτελεί η επιθεώρηση των κατασκευών, καθήκον της οποίας είναι να δώσει τις απαραίτητες πληροφορίες τόσο για τις συνέπειες του σεισμού όσο και για τις απαιτούμενες επισκευές που προκύπτουν. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ο αλγόριθμος με τον οποίο καθορίζονται:

- Ο βέλτιστος αριθμός συνεργείων επιθεώρησης
- Οι βέλτιστες περιοχές ευθύνης των συνεργείων (districting)
- Οι βέλτιστες διαδρομές των συνεργείων εντός των περιοχών ευθύνης τους (routing)

ώστε η επιθεώρηση του αστικού χώρου να ολοκληρωθεί εντός συγκεκριμένου (απαιτούμενου) χρονικού διαστήματος. Ο αλγόριθμος, όσον αφορά τις περιοχές ευθύνης των συνεργείων βασίζεται στο πρόβλημα p -διάμεσου (p -median) ενώ όσον αφορά τις βέλτιστες διαδρομές αυτών βασίζεται στο Traveling Salesman Problem (TSP). Στην πρώτη περίπτωση θα εφαρμοστεί μέθοδος επίλυσης με τον γενετικό αλγόριθμο Harmony Search Minimization (HSM) ενώ στη δεύτερη με τον Ant Colony Optimization (ACO). Γίνεται εφαρμογή του αλγορίθμου στην πόλη της Πάτρας και παρουσιάζονται διαφορετικά σενάρια επίλυσης. Τα σενάρια αυτά εμφανίζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα σχετικά με τη χρησιμότητα του αλγορίθμου στη διαχείριση μετασεισμικών κατασκευών.

1.1. Η Παράμετρος του Σεισμού

Η Ελλάδα, ως γνωστόν, βρίσκεται σε μια αρκετά σειсмоγενή περιοχή. Κατά συνέπεια, δεν είναι καθόλου παράδοξο το γεγονός ότι οι Έλληνες, ήδη από την αρχαιότητα, ασχολήθηκαν με το φαινόμενο του σεισμού. Η επαναφορά των κατασκευών σε λειτουργική κατάσταση ύστερα από την εκδήλωση σεισμικών φαινομένων αποτελεί αντικείμενο μελέτης και έρευνας από αρχαιοτάτων χρόνων. Οικισμοί χιλιάδων ετών που έχουν έρθει στο φως έπειτα από ανασκαφές αρχαιολόγων, φέρουν ίχνη επισκευών ύστερα από σεισμό, ενώ για τους επιστήμονες εμφανίστηκε πλούσιο υλικό για μελέτη, σχετικά με τις τότε υπάρχουσες αντισεισμικές κατασκευές, το οποίο αποτελεί και πηγή έμπνευσης για τις τωρινές.

Στην εποχή μας, αντιλαμβανόμαστε ότι το φαινόμενο του σεισμού παραμένει σταθερά ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που οφείλουμε να αντιμετωπίσουμε, και μάλιστα περισσότερο από άλλοτε, εξαιτίας των σημαντικών οικονομικών ποσών που έχουν επενδυθεί στα έργα υποδομής τα τελευταία έτη. Είναι πραγματικότητα ότι η παράμετρος του σεισμού εμπεριέχεται στις μελέτες κατασκευής, όπως και το ότι η Ελλάδα, σε παγκόσμιο επίπεδο, διαθέτει πλήρεις αντισεισμικούς κανονισμούς και κανονισμούς σκυροδέματος (αναφορά).

Παρόλα αυτά, οι υποδομές τίθενται υπό έλεγχο έπειτα από έναν σεισμό καθώς κανένας κανονισμός δεν μπορεί να εξασφαλίσει εξ' ολοκλήρου τη πλήρη θωράκιση των κατασκευών. Ο τρόπος κατασκευής, διάφορα τυχαία γεγονότα, ακόλουθες επεμβάσεις κλπ. υπάρχει πιθανότητα να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στην αντίδραση μιας κατασκευής μετά από ένα σεισμικό γεγονός, ακόμη και αν η μελέτη της κατασκευής αυτής στηρίχθηκε πλήρως στους κανονισμούς. Κατά συνέπεια, απαραίτητη κρίνεται η οργάνωση μετασεισμικών δράσεων με στόχο την επιθεώρηση και επισκευή των υποδομών με το λιγότερο δυνατό κόστος.

Πιο συγκεκριμένα, αναφορικά με τις συνέπειες ενός σεισμού, ιδιαιτέρως στις αστικές περιοχές, που είναι εντονότερες (όπως θα αναφερθεί και στη συνέχεια) η οργάνωση μετασεισμικών δράσεων (ή αλλιώς μετασεισμική διαχείριση) αποτελεί

απαραίτητη ενέργεια και αναμφίβολα άμεση προτεραιότητα. Η σπουδαιότητα αυτών των δράσεων διαφαίνεται και από την αδυναμία βραχυπρόθεσμης και ακριβούς πρόβλεψης ενός σεισμικού γεγονότος, καθώς και από το γεγονός ότι η μοναδική εκ των προτέρων προστασία στηρίζεται στην προσεκτική μελέτη κατασκευών. Βεβαίως, θα πρέπει να επισημανθεί, ότι ατέλειες ή κακοτεχνίες που μπορεί να εντοπιστούν στις κατασκευές είναι ανθρωπίνως αδύνατο να προβλεφθούν και να αντιμετωπιστούν πλήρως.

1.2. Οι Επιπτώσεις του Σεισμού

Κύριο χαρακτηριστικό του Ελλαδικού Χώρου είναι η έντονη σεισμικότητα που έχει αντίκτυπο και στην κοινωνικοοικονομική ζωή της χώρας. Το πιο σημαντικό μέρος των άμεσων συνεπειών ενός σεισμού συγκεντρώνεται στις κατασκευές. Ειδικότερα, οι επιπτώσεις ενός σεισμού θα είναι εντονότερες στις επαρχιακές πόλεις, καθώς η δόμηση είναι αρκετά πιο πυκνή και οι κατασκευές χαρακτηρίζονται από ποικιλία τόσο σε ποιότητα, μέγεθος και ηλικία. Επιπροσθέτως, ανάλογα θα είναι και τα κοινωνικοοικονομικά φαινόμενα που θα προκύψουν, λόγω των πολλών δραστηριοτήτων στον αστικό χώρο, πέρα από τις δομικές επιπτώσεις στις κατασκευές. Το φαινόμενο γίνεται ακόμη πιο έντονο στον Ελλαδικό χώρο, εξαιτίας της σχετικά άναρχης δόμησης των αστικών κέντρων, αλλά και της αυξημένης συγκέντρωσης του πληθυσμού σε περιοχές που θεωρούνται επικίνδυνες σεισμικά.

1.3. Η Αντιμετώπιση του Σεισμικού Φαινομένου

Η αντιμετώπιση των επιπτώσεων των σεισμών διακρίνεται σε δύο επίπεδα:

- Πρόληψη
- Μετασεισμική διαχείριση

Σχετικά με το επίπεδο της πρόληψης έχει εξεταστεί εκτενώς στη βιβλιογραφία, τόσο σε εγχώριο όσο και σε διεθνές επίπεδο. Σαν αποτέλεσμα μακρόχρονης έρευνας και εμπειρίας αναφορικά στο αντικείμενο της συμπεριφοράς των κατασκευών έναντι σεισμών αλλά και της ενίσχυσης των κατασκευών έναντι σεισμικών δράσεων, έχει προκύψει πληθώρα κανονισμών και οδηγιών που οδηγούν στο σχεδιασμό και στην υλοποίηση κατασκευών οι οποίες είναι ιδιαίτερα ανθεκτικές

έναντι σεισμικών δράσεων. Οι κανονισμοί αυτοί ανανεώνονται συνεχώς και αποτελούν απαραίτητο εργαλείο για τους μηχανικούς μελετητές και κατασκευαστές.

Παρά την αυστηρότητα που διακρίνει τους κανονισμούς σχεδιασμού και υλοποίησης κατασκευών στην Ελλάδα (αντισεισμικός κανονισμός, κανονισμός οπλισμένου σκυροδέματος κ.α.), η εγγενής αδυναμία των κανονισμών να καλύψουν την κάθε πιθανή υποπερίπτωση σεισμικής δράσης (κάτι που θα οδηγούσε σε υπερδιαστασιοποιημένες και αντικοινομικές κατασκευές), οι πιθανές ατέλειες ή κακοτεχνίες στην κατασκευή και η σχετική άγνοια στην ποιότητα των υλικών, ακόμη και η χρήση παλαιότερων, λιγότερο αυστηρών κανονιστικών διατάξεων, αυξάνουν την πιθανότητα ζημιών στις κατασκευές [αναφορά]. Επιπρόσθετα, ακόμη και η καθαυτή συμπεριφορά των κατασκευών έναντι των σεισμικών δράσεων δεν είναι πάντα δεδομένη.

1.4. Η Μετασεισμική Διαχείριση των Υποδομών

Λαμβάνοντας τα παραπάνω ως δεδομένα, κρίνεται επιβεβλημένη η μετασεισμική διαχείριση του σεισμικού γεγονότος, η οποία περιλαμβάνει [αναφορά]:

- Επιθεώρηση των κατασκευών.
- Αποτίμηση κατάστασης κατασκευών.
- Προτάσεις για επισκευές στις κατασκευές.
- Εκτίμηση κόστους επισκευών κατασκευών.
- Κατανομή πόρων για επισκευές.

Οι παραπάνω ενέργειες εντάσσονται σε ένα πλαίσιο ενεργειών μετασεισμικής διαχείρισης που θα πρέπει να πραγματοποιηθούν σε βραχυπρόθεσμο - μεσοπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα μετά από τη σεισμική δράση. Η πλέον επείγουσα ενέργεια είναι η επιθεώρηση των κατασκευών, ώστε να είναι δυνατή η αποτίμηση της κατάστασης των κατασκευών και η δυνατότητα πραγματοποίησης δραστηριοτήτων εντός αυτών (οίκηση, εργασία, εκπαίδευση, ψυχαγωγία, υπηρεσίες), ώστε να ομαλοποιηθεί η λειτουργία του αστικού χώρου [αναφορά].

Η επιθεώρηση των κατασκευών πρέπει συνεπώς να πραγματοποιηθεί άμεσα και γρήγορα μετά από το σεισμικό γεγονός. Πέρα από οργανωτικά θέματα και διαδικασίες, ιδιαίτερη σημασία έχει ο προγραμματισμός των επιθεωρήσεων ώστε

αυτές να πραγματοποιηθούν στο συντομότερο δυνατό χρόνο, με τους διαθέσιμους πόρους και συνθήκες. Είναι βέβαια δυνατή και η εκ των προτέρων εκπόνηση προγραμμάτων επιθεώρησης, τα οποία και θα πρέπει να εφαρμοστούν μετά από σεισμό, αλλά το μειονέκτημά τους είναι η άγνοια στη διαθεσιμότητα πόρων (ανθρώπινου δυναμικού και εξοπλισμού) μετά από τη σεισμική δράση [αναφορά].

1.5. Αντικείμενο της Εργασίας

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε τη σπουδαιότητα της μετασεισμικής διαχείρισης των υποδομών εντός του αστικού χώρου και ιδιαιτέρως του προγραμματισμού και της διεξαγωγής ενεργειών επιθεώρησης, επιδιόρθωσης και αποκατάστασης έπειτα από κάποιο σεισμικό γεγονός. Η πολιτεία μέσω του Ο.Α.Σ.Π., και σε συνεργασία με την επιστημονική κοινότητα δραστηριοποιείται και πράττει αξιόλογο έργο προκειμένου [αναφορά]:

- να προειδοποιεί και να ενημερώνει άμεσα και έγκυρα την Πολιτεία για τον κίνδυνο σεισμού στη χώρα μας από τους εμπλεκόμενους επιστημονικούς φορείς, ώστε να είναι δυνατός και ο σχεδιασμός, αλλά και η αντιμετώπιση του φαινομένου
- να ενισχύει τη σεισμική ικανότητα των κατασκευών και κυρίως των κτιρίων, με τη χρήση αλλά και τη δημιουργία σύγχρονων κανονισμών και αποτελεσματικών ελέγχων, που θα έχουν σκοπό την ελαχιστοποίηση των καταστροφών
- να μελετά και να σχεδιάζει τα κατάλληλα μέτρα ετοιμότητας της Πολιτείας, τα οποία θα συνδράμουν στην αντιμετώπιση των εκτάκτων αναγκών από σεισμό, προκειμένου η έγκυρη κινητοποίηση, η καταλληλότητα σε αριθμό και ποιότητα των δυνάμεων και των μέσων, ο συντονισμός των εμπλεκόμενων φορέων να είναι αποτελεσματικά για να υπάρξει και επιτυχία των ενεργειών αυτών
- να δείχνει εμπιστοσύνη και στήριξη στην εφαρμοσμένη έρευνα που λαμβάνει χώρα στην Ελλάδα, σχετικά με θέματα σεισμολογίας, αντισεισμικών κατασκευών, καθώς και κοινωνικής αντισεισμικής άμυνας, προκειμένου να υπάρξει ανάπτυξη στην επιστημονική γνώση και στην τεχνολογία που αποτελούν τα βασικότερα στοιχεία για την αντιμετώπιση σεισμικών φαινομένων

Για να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικότερα η κρίση σε περίπτωση ισχυρού, καταστροφικού σεισμού οφείλει ο μηχανισμός και των Οργανισμών Τοπικής Αυτοδιοίκησης να βρίσκεται σε ετοιμότητα. Είναι βέβαιο ότι η σωστά προσχεδιασμένη και δοκιμασμένη στην προσεισμική περίοδο απόκριση της Πολιτείας, είναι αυτή που θα δώσει τη δυνατότητα ετοιμότητας και θα βοηθήσει άμεσα στην αντιμετώπιση της κρίσης που θα παρουσιαστεί σε μια έκτακτη ανάγκη εξαιτίας ενός σεισμού.

Ο Ο.Α.Σ.Π. αποσκοπεί στον σχεδιασμό των μέτρων ετοιμότητας, σχετικά με την καλύτερη αντιμετώπιση των εκτάκτων αναγκών έπειτα από εκδήλωση σεισμού, από την πλευρά της Πολιτείας, ώστε να εξασφαλιστεί η άμεση κινητοποίηση, η επάρκεια των μέσων και των δυνάμεων, η ταυτόχρονη αντίδραση των φορέων που εμπλέκονται στο μηχανισμό και η αποτελεσματικότητα συνεργασίας όλων αυτών προκειμένου οι πραγματοποιούμενες ενέργειες να στεφθούν με επιτυχία.

Ο Ο.Α.Σ.Π. διαθέτει το απαραίτητο έμπειρο επιστημονικό προσωπικό αλλά κατέχει και τη τεχνογνωσία και την υποδομή για την έρευνα εξειδικευμένων θεμάτων που σχετίζονται με τους σεισμούς και τις επιχειρήσεις έκτακτης ανάγκης, γι' αυτό και η συμμετοχή του και ο προσανατολισμός του προς αυτή την κατεύθυνση είναι ιδιαίτερος σημαντικά.

Στα πλαίσια αυτά ο Ο.Α.Σ.Π. έχει δραστηριοποιηθεί στα ακόλουθα [αναφορά]:

- σύνταξη του νέου Επιχειρησιακού Σχεδίου Έκτακτης Ανάγκης «Ξενοκράτης - Σεισμοί» (Ιούνιος 1999)
- ανάθεση και επεξεργασία θεμάτων σχετικών με επιχειρήσεις διάσωσης όπως: σύνταξη τεχνικού εγχειριδίου με θεματολογία σχετική με επιχειρήσεις διάσωσης εγκλωβισμένων σε ερείπια, διοργάνωση ασκήσεων απεγκλωβισμού ατόμων καθώς και χρηματοδότηση κατασκευής συσκευών εντοπισμού ζώντων παγιδευμένων σε ερείπια
- γνωστοποίηση οδηγιών για αποτελεσματικές επεμβάσεις όπως: σύνταξη τεχνικού εγχειριδίου και αντίστοιχου φακέλου (προώθησή τους στις αρμόδιες υπηρεσίες και φορείς) που εμπεριέχουν θέματα υποστυλώσεων, αντιστηρίξεων και άρσης επικινδυνοτήτων
- επανεξέταση μετασεισμικού ελέγχου κτιρίων

Σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση μιας διαδικασίας, η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στη μετασεισμική διαχείριση

συγκεκριμένων αναγκών που θα προκύψουν. Συγκεκριμένα, αναπτύσσεται μεθοδολογία που στοχεύει στο βέλτιστο χωρικό προγραμματισμό επιθεωρήσεων σε κατασκευές εντός του αστικού ιστού, που ακολουθείται έπειτα από μία σεισμική δράση.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η ανάπτυξη ενός προτύπου για τη βέλτιστη κατανομή συνεργείων επιθεωρήσεων των κατασκευών σε αστικό χώρο, τη βέλτιστη οριοθέτηση των περιοχών ευθύνης τους και τη βέλτιστη δρομολόγησή τους εντός των περιοχών. Στοχεύουμε στην καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου ανθρώπινου δυναμικού μέσω της οργάνωση και του προγραμματισμού των επιθεωρήσεων για την αποτίμηση της μετασεισμικής κατάστασης των κατασκευών στο μικρότερο δυνατό χρόνο. Το πρότυπο αυτό λαμβάνει υπόψη παράγοντες όπως η ρυμοτομία του αστικού χώρου, η πυκνότητα της δόμησης, η πληθυσμιακή κατανομή αλλά και το τυχόν διαθέσιμο πλήθος συνεργείων επιθεώρησης. Κατ' αυτόν τον τρόπο προσδιορίζει την προτεραιότητα στην κατανομή των πόρων και δημιουργεί περιοχές ευθύνης, τις οποίες και αντιστοιχεί ανάλογα με τη διαθεσιμότητα.

Το πρότυπο εφαρμόζεται στην πόλη της Πάτρας. Η γεωγραφική τοποθεσία της πόλης της Πάτρας είναι η αιτία για την επιλογή αυτή. Η Πάτρα βρίσκεται στη δυτική Ελλάδα, σε μία ιδιαίτερα σεισμογενή περιοχή, όπου στο παρελθόν έχουν εκδηλωθεί μεγάλοι σεισμοί και έχουν προκληθεί αρκετές και σημαντικές καταστροφές σε κατασκευές. Συνέπεια αυτών, μεγάλα κεφάλαια σε υποδομές αλλά και σε ανθρώπινο δυναμικό έχουν χαθεί. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τη μεγάλη σημασία που έχει η πόλη αυτή για την Ελλάδα, αφού αποτελεί την τρίτη μεγαλύτερη πληθυσμιακά πόλη, ένα από τα μεγαλύτερα λιμάνια της Ελλάδας, την πύλη διακίνησης ανθρώπων και αγαθών από και προς τη δυτική Ευρώπη, αλλά και τη μεγαλύτερη πόλη της Πελοποννήσου, την αναδεικνύουν ως την καλύτερη περίπτωση για την εφαρμογή της μελέτης αυτής.

1.6. Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Με βάση τα παραπάνω, η δομή της διπλωματικής εργασίας έχει ως εξής:

- Στο δεύτερο κεφάλαιο παρατίθεται βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετική με το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.
- Στο τρίτο κεφάλαιο παρατίθεται η λογική πίσω από τους γενετικούς αλγορίθμους που θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εργασία.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθεται η μορφή και λειτουργία του αλγορίθμου που συντάχθηκε για τις ανάγκες αυτής της εργασίας και τα απαραίτητα διαγράμματα ροής.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο δίνονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αλγορίθμου στην πόλη της Πάτρας με αναλυτική παρουσίαση της καλύτερης και της χειρότερης, ποιοτικά, λύσης.
- Στο έκτο κεφάλαιο αποτιμώνται τα αποτελέσματα και προτείνονται ιδέες προς περαιτέρω διερεύνηση.

Η εργασία ολοκληρώνεται με τις βιβλιογραφικές αναφορές.

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1. Η Παράμετρος του Σεισμού

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει προσπάθεια να παρουσιασθεί και να αναλυθεί η βιβλιογραφία που ευρέως έχει δημιουργηθεί τα τελευταία 40 χρόνια, αναφορικά με τα προβλήματα χωροθέτησης μονάδων παροχής εξυπηρέτησης και άμεσης αντιμετώπισης. Βασικά χαρακτηριστικά της περιόδου αυτής είναι η άνευ προηγουμένου και σύγκρισης ανάπτυξη στην τεχνολογία των υπολογιστών, στην ανάλυση προτύπων και αλγορίθμων, καθώς και στην εκτέλεση και επίλυση μαθηματικών προγραμμάτων με χρήση προηγμένου λογισμικού φιλικό προς το χρήστη. Η βιβλιογραφία στην χωροθέτηση μονάδων παροχής εξυπηρέτησης και άμεσης βοήθειας αντανακλά αυτή την εξέλιξη. Τα πρότυπα βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκαν μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

α. τα στατικά και ντετερμινιστικά πρότυπα τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως στο στάδιο του σχεδιασμού και αγνοούν τις πιθανοτικές συνιστώσες του προβλήματος,

β. τα πιθανοτικά πρότυπα τα οποία αναπτύχθηκαν για να προσεγγίσουν τον стоχαστικό χαρακτήρα των συστημάτων. Δηλαδή οι μονάδες παροχής εξυπηρέτησης και άμεσης βοήθειας λειτουργούν ως ένα σύστημα χωρικών ουρών (*spatial queues*) και ότι ίσως, κάποιες φορές, να μην είναι διαθέσιμες για να εξυπηρετήσουν μία κλήση για επέμβαση.

Πριν εισχωρήσουμε σε μια πιο αναλυτική προσέγγιση των προαναφερθέντων θα πρέπει να αναφέρουμε τις ρίζες της Επιστήμης Χωροθέτησης (*Location Science*) την οποία ο Reville (1997) έκανε γνωστή ως Τοποθεσιολογία (*Topothesiology*). Οι βάσεις της επιστήμης αυτής ανάγονται αποκλειστικά στους Έλληνες γεωμέτρους, όπως ο Ευκλείδης και ο Πυθαγόρας, οι οποίοι πρώτοι ανέπτυξαν γεωμετρικά πρότυπα απόστασης. Ιστορικά, η πρώτη μεθοδική μελέτη που εκπονήθηκε σε πρόβλημα 'τοποθεσιολογίας' μας οδηγεί στη Βυζαντινή αυτοκρατορία του 4^ο μ.Χ. αιώνα, και πιο συγκεκριμένα στον Κωνσταντίνο τον Πορφυρογέννητο, που βρέθηκε αντιμέτωπος με ένα τέτοιο πρόβλημα όταν σε ένα δίκτυο με διακριτές διαθέσιμες θέσεις επρόκειτο θέλησε να τοποθετήσει έξι Ρωμαϊκές Λεγεώνες. Οι Λεγεώνες

έλαβαν συγκεκριμένες θέσεις ούτως ώστε όταν μια ομάδα στρατιωτών από κάθε απόσπασμα επιφυλακής κάνει μια απλή μετακίνηση να μπορεί να υπερασπιστεί ταυτόχρονα και τα σύνορα αλλά και το εσωτερικό μιας ευρέως διασπαρμένης αυτοκρατορία από απειλές εισβολέων ή από τοπικές αναταραχές και ανταρσίες.

2.2 Στατικά και Ντετερμινιστικά πρότυπα τοποθεσιολογίας

2.2.1 Εισαγωγή

Τα πρώτα προβλήματα που παρουσιάστηκαν σχετικά με τη χωροθέτηση μονάδων που παρέχουν εξυπηρέτηση διατυπώνονται ως στατικά και ντετερμινιστικά. Τα προβλήματα αυτά θέτουν ως δεδομένα εισόδου (*input*) σταθερές και γνωστές και ψάχνουν να βρουν μια λύση που αντιστοιχεί σε μια χρονική στιγμή (σταθερή ως προς το χρόνο). Η επιλογή της λύσης γίνεται λαμβάνοντας υπόψη ένα από πολλά πιθανά κριτήρια ή αντικειμενικές συναρτήσεις. Πολλές ήταν οι έρευνες που είχαν ως αντικείμενό τους τα προβλήματα εφαρμογών και την μελέτη και εξέταση πολυκριτηριακών επεκτάσεων των βασικών αυτών προτύπων. Στο υποκεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στα βασικά στατικά και ντετερμινιστικά πρότυπα. Η ανασκόπηση αυτή στηρίζεται σε διάφορες αντικειμενικές συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται σε συνηθισμένες εφαρμογές και περιλαμβάνει τις σημαντικότερες έρευνες που σχετίζονται με την κάθε κατηγορία προβλήματος.

2.2.2 Προβλήματα διάμεσου (Median Problem)

Σύμφωνα με τους Church και ReVelle (1976), μια εκ των βασικών προσεγγίσεων για να υπολογίσουμε την αποτελεσματικότητα της παροχής άμεσης βοήθειας ενός συστήματος χωροθετημένων μονάδων είναι να προσδιορίσουμε τη μέση διανυόμενη απόσταση ή τον απαιτούμενο χρόνο προκειμένου να εξυπηρετηθεί η ζήτηση. Όσο αυξάνει η μέση διανυόμενη απόσταση ή ο απαιτούμενος χρόνος, τόσο μειώνεται η προσιτότητα των μονάδων και επομένως, ελαττώνεται και η αποτελεσματικότητα όλου του συστήματος χωροθέτησης.

Έναν ανάλογο τρόπο για να υπολογισθεί η αποτελεσματικότητα ενός συστήματος χωροθετημένων μονάδων σε περίπτωση που η ζήτηση είναι ανεξάρτητη του επιπέδου παροχής εξυπηρέτησης εισήγαγε ο Hakimi (1964), θέτοντας στην

απόσταση μεταξύ κόμβων ζήτησης και κωροθετημένων μονάδων μια συνάρτηση βάρους που σχετίζεται με τη ζήτηση και υπολογίζοντας τη μέση , σταθμισμένη με τη ζήτηση, διανυόμενη απόσταση μεταξύ κόμβων ζήτησης και μονάδων εξυπηρέτησης. Το πρόβλημα P-διάμεσου (*P-median problem*) εκφράζεται ως εξής: Ζητείται η βέλτιστη κωροθέτηση P μονάδων ώστε να ελαχιστοποιηθεί η μέση σταθμισμένη διανυόμενη απόσταση μεταξύ των σημείων ζήτησης και των κωροθετημένων μονάδων. Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού είναι:

$$\text{Minimize } \sum_{i \in V} \sum_{j \in W} h_i d_{ij} Y_{ij} \quad (2.1)$$

subject to

$$\sum_{j \in W} X_j = P, \quad (2.2)$$

$$\sum_{j \in W} Y_{ij} = 1 \quad \forall i, \quad (2.3)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i, j \quad (2.4)$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall j, \quad (2.5)$$

$$Y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j. \quad (2.6)$$

όπου:

W = σύνολο δυνατών (εφικτών) θέσεων στάθμευσης μονάδων παροχής άμεσης βοήθειας (με δείκτη j)

V = σύνολο κόμβων ζήτησης παροχής υπηρεσίας (με δείκτη i)

h_i = ζήτηση στον κόμβο i

d_{ij} = απόσταση μεταξύ κόμβων i και j

P = αριθμός τοποθετούμενων μονάδων παροχής άμεσης βοήθειας

$$X_j = \begin{cases} 1 & \text{αν το κινητό συνεργείο τοποθετείται στο κόμβο } j \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{αν η ζήτηση στον κόμβο } i \text{ εξυπηρετείται από μια μονάδα στον κόμβο } j \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (2.1), όπως προαναφέρθηκε, στοχεύει στην ελάττωση της μέσης σταθμισμένης διανυόμενης απόστασης μεταξύ των σημείων ζήτησης και των χωροθετημένων μονάδων. Ο περιορισμός (2.2) επιβάλλει ότι συνολικά P μονάδες θα τοποθετηθούν, ο περιορισμός (2.3) εξασφαλίζει ότι κάθε κόμβος ζήτησης ανατίθεται σε κάποια μονάδα, ενώ ο περιορισμός (2.4) επιτρέπει αποστολή μόνο σε κόμβους όπου έχει τοποθετηθεί μονάδα. Στην εφαρμογή του σε ένα γενικευμένο δίκτυο το πρόβλημα p -διάμεσου είναι δύσκολο να δώσει βέλτιστη λύση. Περιορίζοντας τις δυνατές θέσεις χωροθετημένων μονάδων στους κόμβους του δικτύου μειώνεται ο αριθμός των πιθανών συνδυασμών χωροθέτησης σε:

$$\binom{N}{P} = \frac{N!}{P!(N-P)!} \quad (2.7)$$

όπου ο N αντιπροσωπεύει τον αριθμό των κόμβων στο δίκτυο. Ωστόσο, μια συνολική απαριθμούσα προσέγγιση θα ήταν υπολογιστικά απαγορευτική για λογικές τιμές των P και N (δεκάδες εκατοντάδες κόμβοι και δεκάδες χωροθετημένες μονάδες). Αυτή η πολυπλοκότητα είχε ως επακόλουθο την ανάπτυξη μαθηματικών αλγορίθμων και ευρεστικών τεχνικών για την επίλυση του προβλήματος. Μπορούν να αναφερθούν οι Daskin και Haghani (1984) για μια περιληπτική αναφορά σε ευρεστικές τεχνικές και οι Schilling et al. (1993) για περισσότερες πληροφορίες σε συγκεκριμένες μεθόδους επίλυσης και εφαρμογές.

2.2.3 Προβλήματα Κάλυψης

2.2.3.1 Εισαγωγή

Το πρόβλημα p -διάμεσου, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην τοποθέτηση μιας ευρείας κλίμακας μονάδες παροχής εξυπηρέτησης. Όμως για ορισμένες περιπτώσεις, όπως η χωροθέτηση ασθενοφόρων ή πυροσβεστικών οχημάτων σε μία πόλη, η επιλογή μονάδων που ελαχιστοποιούν τη μέση διανυόμενη απόσταση ίσως να είναι ακατάλληλη (Daskin

και Owen, 1998). Ο σημαντικός ρόλος της ζήτησης για την παροχή εξυπηρέτησης τέτοιων συνεργείων απαιτεί ένα μέγιστα αποδεκτό χρόνο ή απόσταση επέμβασης. Τέτοιες μονάδες υπαγορεύουν ένα διαφορετικό τρόπο μέτρησης της αποτελεσματικότητας τους.

Η χωροθέτηση τέτοιων μονάδων χρειάζεται την κάλυψη (*coverage*) της περιοχής μελέτης υπό τους περιορισμούς ζήτησης και μέγιστου χρόνου απόκρισης. Λέγεται ότι η εξυπηρέτηση μιας περιοχής μπορεί να καλυφθεί όταν είναι σε θέση να εξυπηρετηθεί εντός ενός προκαθορισμένου χρόνου ή απόστασης. Η βιβλιογραφία στα προβλήματα κάλυψης χωρίζεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, αυτές στις οποίες η κάλυψη απαιτείται και σε αυτές όπου η κάλυψη βελτιστοποιείται.

2.2.3.2 Πρότυπα με απαιτούμενη κάλυψη

Αναφορικά με την πρώτη μεγάλη κατηγορία, το πιο αντιπροσωπευτικό και χρησιμοποιήσιμο πρότυπο είναι αυτό της Καθορισμένης Κάλυψης. Στο *Πρότυπο Χωροθέτησης Καθορισμένης Κάλυψης (Location Set Covering Model, LSCM)*, το οποίο εισήχθη από τους Toregas et al. (1971), ο σκοπός είναι ο αριθμός των απαιτούμενων μονάδων να μειωθεί ώστε όλη η ζήτηση να καλυφθεί για εξυπηρέτηση της περιοχής εντός χρόνου r . Η διατύπωση του προβλήματος είναι η παρακάτω:

$$\text{Minimize } \sum_{j \in W} x_j \quad (2.8)$$

subject to

$$\sum_{j \in W_i} x_j \geq 1 \quad (i \in V), \quad (2.9)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad (j \in W) \quad (2.10)$$

όπου:

W = σύνολο δυνατών θέσεων τοποθέτησης κινητού συνεργείου παροχής υπηρεσιών (με δείκτη j)

V = σύνολο κόμβων ζήτησης παροχής υπηρεσίας (με δείκτη i)

$$W_i = \{j \in W : t_{ij} \leq r\}$$

t_{ij} = χρόνος συντομότερης διαδρομής από κόμβο i σε συνεργείο j

r = προκαθορισμένη σταθερά χρονικής κάλυψης (*preset coverage standard*)

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{αν το κινητό συνεργείο τοποθετείται στο κόμβο } j \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (2.8) ελαχιστοποιεί τον αριθμό των οχημάτων ώστε να καλυφθεί η ζήτηση της περιοχής μέσα σε προκαθορισμένο χρόνο. Ο περιορισμός (2.9) καθορίζει ότι όλα τα σημεία της περιοχής πρέπει να καλύπτονται εντός χρόνου r .

Το LSCM αγνοεί σημαντικές όψεις των πραγματικών προβλημάτων. Οι βασικότερες είναι οι εξής:

- α. Δεν υπάρχει διάκριση μεταξύ της ζήτησης για εξυπηρέτηση κάθε κόμβου. Συγκεκριμένα, κάθε κόμβος είτε περιλαμβάνει έναν μόνο πελάτη είτε μεγάλο τμήμα της συνολικής ζήτησης, πρέπει, άσχετα με το κόστος, να καλυφθεί από τη δοθείσα χρονική απόσταση r .
- β. Αν ένα όχημα είναι μη διαθέσιμο, ίσως κάποια σημεία να μην καλύπτονται πια εντός της δοθείσας χρονικής απόστασης (Laporte et al., 2003). Ουσιαστικά, προτάσσει ένα *κάτω όριο του αριθμού των μονάδων που απαιτούνται* ώστε να έχουμε πλήρη κάλυψη της περιοχής.

2.2.3.3 Πρότυπα με βελτιστοποίηση κάλυψης

2.2.3.3.1 Πρόβλημα Χωροθέτησης Μέγιστης Κάλυψης

Οι Church και Reville (1974) πρότειναν μια εναλλακτική προσέγγιση, για την αντιμετώπιση των ελλείψεων και των μειονεκτημάτων του LSCM, το Μέγιστης Κάλυψης Πρόβλημα Χωροθέτησης (*Maximal Covering Location Problem, MCLP*). Το πρότυπο αυτό αποτέλεσε την πρώτη προσπάθεια κατά την οποία οι ερευνητές έλαβαν υπόψη παράλληλα και έναν περιορισμένο αριθμό μονάδων παροχής άμεσης βοήθειας αλλά και το γεγονός ότι η κάλυψη ενός κόμβου επιτυγχάνεται μόνο στην περίπτωση που η μονάδα θα τοποθετηθεί έτσι ώστε να απέχει το πολύ μια χρονική ή χωρική σταθερά. Η διατύπωση αυτή *επιχειρεί να τοποθετήσει p μονάδες σε ένα*

δίκτυο κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο μέγιστος πληθυσμός να καλύπτεται από τουλάχιστον μία μονάδα:

$$\text{Maximize } \sum_{i \in V} d_i y_i \quad (2.11)$$

subject to

$$\sum_{j \in W_i} x_j \geq y_i \quad (i \in V), \quad (2.12)$$

$$\sum_{j \in W} x_j = p, \quad (2.13)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad (j \in W), \quad (2.14)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad (i \in V). \quad (2.15)$$

όπου:

W = σύνολο δυνατών θέσεων μονάδων παροχής άμεσης βοήθειας (με δείκτη j)

V = σύνολο κόμβων ζήτησης παροχής υπηρεσίας (με δείκτη i)

$$W_i = \{j \in W : t_{ij} \leq r\}$$

t_{ij} = χρόνος συντομότερης διαδρομής από κόμβο i σε κόμβο j

r = προκαθορισμένη σταθερά χρονικής κάλυψης (*preset coverage standard*)

p = αριθμός τοποθετούμενων μονάδων

d_i = ζήτηση για εξυπηρέτηση κόμβου i

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{αν το κινητό συνεργείο τοποθετείται στο κόμβο } \bar{j}, \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{αν ο κόμβος } i \text{ καλύπτεται από τουλάχιστον μία μονάδα} \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (2.11) μεγιστοποιεί την καλυπτόμενη ζήτηση. Ο περιορισμός (2.12) καθορίζει το αν η ζήτηση στον κόμβο i καλύπτεται κάθε φορά από μία τουλάχιστον μονάδα που απέχει το πολύ απόσταση r από τον κόμβο i . Ο περιορισμός (2.13) δείχνει τον αριθμό των μονάδων που θα τοποθετηθεί. Αυτός ο τελευταίος περιορισμός μπορεί να «χαλαρώσει» (*relaxed*) στον:

$$\sum_{j \in W} x_j \leq p, \quad (2.16)$$

γιατί για μια καταλληλότερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (2.11) θα οδηγήσει την επίλυση στον απαιτούμενο αριθμό συνεργείων. Βέβαια, το αρνητικό που παρουσιάζεται στο πρότυπο αυτό είναι ότι δεν υπολογίζει την πιθανότητα ότι κάποια μονάδα μπορεί να είναι μη διαθέσιμη στην περίπτωση που θα κληθεί να καλύψει συγκεκριμένη ζήτηση. Οι Eaton et al. (1985) χρησιμοποίησαν το MCLP για να σχεδιάσουν το σύστημα επείγουσας ιατρικής ανάγκης στο Austin του Texas. Το προτεινόμενο σχέδιο εφαρμογής μείωσε τα κατασκευαστικά έξοδα της πόλης κατά 3.4 εκατομμύρια δολάρια (\$) και τα έξοδα λειτουργίας κατά 1.2 εκατομμύρια δολάρια (\$). Ταυτόχρονα, ο μέσος χρόνος επέμβασης μειώθηκε, αν και οι κλήσεις για επέμβαση αυξήθηκαν.

2.2.3.3.2 Πρότυπα πολλαπλής μέγιστης κάλυψης - υπερκάλυψης

Παρά την σπουδαιότητα των προηγούμενων προτύπων σημαντική θεωρείται η αναφορά στο ότι κανένα από αυτά δεν ασχολείται με την πιθανότητα ύπαρξης διαφορετικών τύπων οχημάτων που καλούνται σε κάθε περιστατικό. Σε αυτό το υποκεφάλαιο αναπτύσσονται πρότυπα που σχετίζονται με την πολλαπλή κάλυψη των περιστατικών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιου φαινομένου πολλαπλής κάλυψης παρατηρείται σε πυροσβεστικές εταιρίες, οι οποίες λειτουργούν με δύο τύπους οχημάτων (πυροσβεστικές αντλίες και σκάλες διάσωσης) καθώς και σε ασθενοφόρα επείγουσας (Advanced Life Support) και άμεσης (Basic Life Support) επέμβασης.

Ένα από τα πρώτα πρότυπα που αναπτύχθηκαν για τη διαχείριση οχημάτων διάφορων τύπων είναι το Συνεργαζόμενων Εξοπλισμών Πρότυπο Χωροθέτησης (Tandem Equipment Allocation Model) από τους Schilling et al. (1979), στο οποίο υπάρχουν δύο τύποι οχημάτων A και B. Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού είναι η εξής:

$$\text{Maximize } \sum_{i \in V} d_i y_i \quad (2.17)$$

subject to

$$\sum_{j \in W_i^A} x_j^A \geq y_i \quad (i \in V), \quad (2.18)$$

$$\sum_{j \in W_i^B} x_j^B \geq y_i \quad (i \in V), \quad (2.19)$$

$$\sum_{j \in W} x_j^A = p^A, \quad (2.20)$$

$$\sum_{j \in W} x_j^B = p^B, \quad (2.21)$$

$$x_j^A \leq x_j^B \quad (j \in W), \quad (2.22)$$

$$x_j^A, x_j^B \in \{0,1\} \quad (j \in W), \quad (2.23)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad (i \in V). \quad (2.24)$$

όπου:

W = σύνολο δυνατών θέσεων μονάδων παροχής άμεσης βοήθειας (με δείκτη j)

V = σύνολο κόμβων ζήτησης παροχής υπηρεσίας (με δείκτη i)

$$W_i^A = \{j \in W : t_{ij} \leq r^A\}$$

$$W_i^B = \{j \in W : t_{ij} \leq r^B\}$$

r^A, r^B = προκαθορισμένη σταθερά χρονικής κάλυψης για τα οχήματα τύπου A,B

p^A, p^B = αριθμός τοποθετούμενων μονάδων τύπου A,B

d_i = ζήτηση για εξυπηρέτηση κόμβου i

$$x_j^A, x_j^B = \begin{cases} 1 & \text{αν το όχημα τύπου A,B τοποθετείται στο κόμβο } j \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{αν ο κόμβος } i \text{ καλύπτεται και από τους δύο τύπους οχημάτων} \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (2.17) μεγιστοποιεί την καλυπτόμενη ζήτηση. Οι περιορισμοί (2.18) και (2.19) καθορίζουν αν η ζήτηση στον κόμβο i καλύπτεται

κάθε φορά από μία τουλάχιστον μονάδα τύπου A ή B που απέχουν το πολύ απόσταση r^A ή r^B αντίστοιχα από τον κόμβο i . Οι περιορισμοί (2.20) και (2.21) προσδιορίζουν τον αριθμό των μονάδων τύπου A και τύπου B που θα τοποθετηθούν, ενώ ο περιορισμός (2.22) θέτει μια ιεραρχία μεταξύ των δύο τύπων οχημάτων, η οποία όμως μπορεί και να παραληφθεί σε περιπτώσεις που οι συνθήκες του προβλήματος δε τη δικαιολογούν.

Το ανωτέρω πρότυπο ουσιαστικά αποτελεί μία απευθείας επέκταση του Μέγιστης Κάλυψης Προβλήματος Χωροθέτησης (MCLP) για να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις μονάδων διαφορετικού τύπου. Με βάση την ίδια λογική μπορεί να διαμορφωθεί ώστε υπάρξει εφαρμογή και για περισσότερα από δύο διαφορετικού τύπου οχήματα.

Τα πρότυπα αυτά, TEAM και MCLPT, καθιστούν ανεπαρκή την κάλυψη σε περίπτωση που κάποιες μονάδες είναι απασχολημένες. Για το λόγο αυτό, οι Hogan και Reville ανέπτυξαν μια στρατηγική (1986) που να παρέχει καλύτερη πολλαπλή κάλυψη, χωρίς να παρατηρείται όμως αύξηση στον συνολικό αριθμό μονάδων παραπάνω από p . Όπως προτάθηκε από τους Daskin και Stern (1981), μια δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να ενσωματωθεί στο MCLP, ώστε να γίνονται πιο ευδιάκριτα τα πολλαπλά βέλτιστα της (2.11). Οι μελετητές εφαρμόζουν μια ιεραρχική αντικειμενική συνάρτηση για να μεγιστοποιήσουν τον αριθμό των σημείων ζήτησης που καλύπτονται περισσότερο από μία φορά ή για να μεγιστοποιήσουν την ζήτηση, η οποία καλύπτεται δύο φορές (δηλαδή από δύο μονάδες). Παρουσιάζονται παρακάτω οι μαθηματικές διατυπώσεις των δύο Προτύπων Εφεδρικής Κάλυψης (BACoverage Problem), τα οποία ονομάζονται Πρότυπο Εφεδρικής κάλυψης 1 και 2 αντίστοιχα.

$$\text{Maximize } \sum_{i \in V} d_i u_i \quad (2.25)$$

subject to

$$\sum_{j \in W_i} x_j - u_i \geq 1 \quad (i \in V), \quad (2.26)$$

$$\sum_{j \in W} x_j = p, \quad (2.27)$$

$$u_i \in \{0,1\} \quad (i \in V), \quad (2.28)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad (j \in W). \quad (2.29)$$

και

$$\text{Maximize } \theta \sum_{i \in V} d_i y_i + (1 - \theta) \sum_{i \in V} d_i u_i \quad (2.30)$$

subject to

$$\sum_{j \in W_i} x_j - y_i - u_i \geq 0 \quad (i \in V), \quad (2.31)$$

$$y_i - u_i \geq 0 \quad (i \in V), \quad (2.32)$$

$$\sum_{j \in W} x_j = p, \quad (2.33)$$

$$u_i \in \{0,1\} \quad (i \in V), \quad (2.34)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad (i \in V), \quad (2.35)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad (j \in W). \quad (2.36)$$

όπου:

W = σύνολο δυνατών θέσεων μονάδων παροχής άμεσης βοήθειας (με δείκτη j)

V = σύνολο κόμβων ζήτησης παροχής υπηρεσίας (με δείκτη i)

$$W_i = \{j \in W : t_{ij} \leq r\}$$

t_{ij} = χρόνος συντομότερης διαδρομής από κόμβο i σε κόμβο j

r = προκαθορισμένη σταθερά χρονικής κάλυψης (*preset coverage standard*)

p = αριθμός τοποθετούμενων μονάδων

d_i = ζήτηση για εξυπηρέτηση κόμβου i

θ = μέτρο στάθμισης στο $[0,1]$

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{αν το κινητό συνεργείο τοποθετείται στο κόμβο } j, \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

$$u_i = \begin{cases} 1 & \text{αν ο κόμβος } i \text{ καλύπτεται από δύο μονάδες,} \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{αν ο κόμβος } i \text{ καλύπτεται από μόνο μία μονάδα,} \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (2.25) μεγιστοποιεί τη ζήτηση η οποία καλύπτεται δύο φορές τουλάχιστον ενώ η αντικειμενική συνάρτηση (2.30) μεγιστοποιεί το σταθμισμένο άθροισμα των κόμβων ζήτησης που καλύπτονται μία και δύο φορές αντίστοιχα. Οι περιορισμοί (2.26) και (2.31) καθορίζουν αν η ζήτηση στον κόμβο i καλύπτεται διπλά για το BACOP1 και διπλά ή απλά για το BACOP2. Οι περιορισμοί (2.27) και (2.33) προσδιορίζουν τον αριθμό των μονάδων που θα τοποθετηθούν. Ο μόνος διαφορετικός περιορισμός στα δύο πρότυπα είναι ο (2.32), ο οποίος επιβάλλει ένας κόμβος που καλύπτεται διπλά να καλύπτεται και απλά.

Στο πρότυπο που προτάθηκε από τους Gendreau et al. (1997), δύο χρονικές σταθερές κάλυψης χρησιμοποιούνται: r_1 και r_2 , με $r_1 < r_2$. Όλη η ζήτηση πρέπει να καλυφθεί από μέσα σε χρόνο r_2 , και ένα ποσοστό a της ζήτησης πρέπει να καλυφθεί μέσα σε χρόνο r_1 . Η μονάδα που καλύπτει ένα σημείο μέσα σε χρόνο r_2 μπορεί να συμπίπτει με τη μονάδα που καλύπτει ένα σημείο μέσα σε χρόνο r_1 . Το Πρότυπο Διπλής Σταθεράς (*Double Standard Model, DSM*) επιχειρεί να μεγιστοποιήσει τη ζήτηση που καλύπτεται διπλά μέσα σε χρόνο r_1 χρησιμοποιώντας p μονάδες, τοποθετώντας το πολύ p_j μονάδες σε κάθε κόμβο j :

$$\text{Maximize } \sum_{i \in V} d_i x_i^2 \quad (2.37)$$

subject to

$$\sum_{j \in W_i^2} y_j \geq 1 \quad (i \in V), \quad (2.38)$$

$$\sum_{j \in V} d_j x_j^1 \geq a \sum_{i \in V} d_i, \quad (2.39)$$

$$\sum_{j \in W_i^1} y_j \geq x_i^1 + x_i^2 \quad (i \in V), \quad (2.40)$$

$$x_i^1 \geq x_i^2 \quad (i \in V), \quad (2.41)$$

$$\sum_{j \in W} y_j = p, \quad (2.42)$$

$$y_j \leq p_j \quad (j \in W), \quad (2.43)$$

$$x_i^1, x_i^2 \in \{0,1\} \quad (i \in V), \quad (2.44)$$

$$y_j \text{ ακέραιος} \quad (j \in W). \quad (2.45)$$

όπου:

W = σύνολο δυνατών θέσεων μονάδων παροχής άμεσης βοήθειας (με δείκτη j)

V = σύνολο κόμβων ζήτησης παροχής υπηρεσίας (με δείκτη i)

$W_i^1 = \{j \in W : t_{ij} \leq r_1\}$

$W_i^2 = \{j \in W : t_{ij} \leq r_2\}$

r_1, r_2 = προκαθορισμένες σταθερές χρονικής κάλυψης

a = ελάχιστο ποσοστό ζήτησης που πρέπει να καλυφθεί σε χρόνο r_1

p = συνολικός αριθμός τοποθετούμενων μονάδων

p_j = μέγιστος αριθμός τοποθετούμενων μονάδων στον κόμβο j

d_i = ζήτηση για εξυπηρέτηση κόμβου i

$x_i^k = \begin{cases} 1 & \text{αν η ζήτηση στον κόμβο } i \text{ καλύπτεται } k \text{ φορές σε χρόνο } r_1, \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$

y_j = αριθμός μονάδων που τοποθετούνται στον κόμβο j

Η αντικειμενική συνάρτηση (2.37) υπολογίζει την ζήτηση, η οποία καλύπτεται διπλά μέσα σε χρόνο r_1 , οι περιορισμοί (2.38) και (2.39) εκφράζουν τις απαιτήσεις της διπλής κάλυψης. Ο περιορισμός (2.40) εκφράζει τον αριθμό των μονάδων που καλύπτουν τον κόμβο i μέσα σε σε χρόνο r_1 , ενώ ο περιορισμός (2.41) δηλώνει ότι ένας η ζήτηση ενός σημείου δεν μπορεί να καλυφθεί διπλά αν δεν έχει καλυφθεί

απλά. Ο περιορισμός (2.42) καθορίζει τον αριθμό των μονάδων που θα τοποθετηθούν ενώ ο περιορισμός (2.43) τοποθετεί ένα άνω όριο στον αριθμό των μονάδων σε κάθε κόμβο (Laporte et al., 2003). Το Νομοθετικό πλαίσιο της Ιατρικής Βοήθειας για Επείγουσα Ανάγκη των Η.Π.Α. (United States Emergency Medical Services Act) θέτει τιμή για το r_1 τιμή 10 λεπτά και $a=0.95$, ενώ δεν δίνει τιμή για το r_2 .

Στον πίνακα 2.1 συνοψίζονται τα κυριότερα στατικά και ντετερμινιστικά πρότυπα της βιβλιογραφίας και παρουσιάζονται οι αντικειμενικές συναρτήσεις και οι συγγραφείς.

Πίνακας 2.1 : Σύνοψη στατικών και ντετερμινιστικών προτύπων

Συγγραφείς	Χρονολογία	Πρότυπο	Αντικειμενική Συνάρτηση	Οχήματα
Hakimi	1964	P-median	Ελαχιστοποιεί τη μέση διανυόμενη απόσταση	Ένας τύπος. Απεριόριστος αριθμός
Toregas et al.	1971	LSCM	Ελαχιστοποιεί τον αριθμό των μονάδων	Ένας τύπος. Δεδομένος αριθμός
Church και ReVelle	1974	MCLP	Μεγιστοποιεί την κάλυψη της ζήτησης	Ένας τύπος. Δεδομένος αριθμός
Schilling et al.	1979	TEAM	Μεγιστοποιεί την κάλυψη της ζήτησης	Δύο τύποι. Δεδομένος αριθμός
Daskin και Stern	1981	MMCLP	Μεγιστοποιεί την πολλαπλή κάλυψη της ζήτησης	Ένας τύπος. Δεδομένος αριθμός
Hogan και Revelle	1986	BACOP1,2	Μεγιστοποιεί την κάλυψη της ζήτησης απλά και διπλά	Ένας τύπος. Δεδομένος αριθμός
Gendreau et al.	1997	DSM	Μεγιστοποιεί την κάλυψη της ζήτησης τουλάχιστον διπλά σε r_1	Ένας τύπος. Δεδομένος αριθμός

2.3 Στοχαστικά πρότυπα χωροθέτησης

2.3.1 Εισαγωγή

Τα στοχαστικά πρότυπα χωροθέτησης πραγματεύονται την ύπαρξη βαθμού αβεβαιότητας και τυχαιότητας στα πραγματικά συστήματα χωροθέτησης. Η μελέτη και έρευνα στα στοχαστικά προβλήματα χωροθέτησης μπορεί να αναλυθεί σε τρεις βασικές προσεγγίσεις οι οποίες αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία ως *δυναμική προσέγγιση (dynamic approach)*, *πιθανοτική προσέγγιση (probabilistic approach)* και *προσέγγιση σχεδιασμού σεναρίων (scenario planning approach)*. Και στις τρεις αυτές αναλύσεις ο κάθε αριθμός παραμέτρων του προβλήματος μπορεί να θεωρηθεί αβέβαιος, όπως οι χρόνοι επέμβασης, οι ποσότητες της ζήτησης ή οι θέσεις των μονάδων. Τα προβλήματα αυτά θέτουν ως σκοπό τους να τοποθετηθούν οι μονάδες άμεσης επέμβασης στις καταλληλότερες θέσεις, προκειμένου να πληρούνται όλοι οι όροι των ορισμένων σεναρίων και περιορισμών.

2.3.2 Δυναμικά πρότυπα χωροθέτησης

Στην ‘Τοποθεσιολογία’, τα πρότυπα που περιγράφονται παραπάνω αποτελούν ένα σημαντικό κομμάτι της έρευνας, ακριβώς όπως και οι εφαρμογές και οι επεκτάσεις τους. Πολλά από αυτά τα προβλήματα είναι εξαιρετικά δύσκολο να λυθούν. Κατά συνέπεια, φυσικό είναι το γεγονός ότι ένα μεγάλο μέρος της έρευνας είχε ως αντικείμενό της τα στατικά και ντετερμινιστικά πρότυπα χωροθέτησης. Τα προβλήματα χωροθέτησης, με τη δυναμική που παρουσιάζουν, απαιτούν ανάπτυξη προτύπων που έχουν ως προτεραιότητα τους την μελλοντική αυτή αβεβαιότητα. Η δυσκολία που παρουσιάζεται είναι ότι αυτά πρέπει να λύνονται πολλάκις επαναλαμβανόμενα με μικρή χρονική προθεσμία. Το δυναμικό πρόβλημα, με την ανάπτυξη γρήγορων ευρεστικών αλγορίθμων και υπολογιστικών τεχνολογιών, είναι δυνατό να λύνεται σε πραγματικό χρόνο.

Οι αποφάσεις για την επανατοποθέτηση (*relocation decisions*), που έπεται της τοποθέτησης μονάδων άμεσης επέμβασης, πρέπει να λαμβάνονται κατά συχνά

χρονικά διαστήματα ώστε να μην υπάρχουν περιοχές που πιθανώς δεν θα εξυπηρετούνται τουλάχιστον εντός ανεκτών χρονικών ορίων. Αυτό επισημάνθηκε από τους Kolesar και Walker (1974), οι οποίοι σχεδίασαν ένα σύστημα επανατοποθέτησης για πυροσβεστικούς σταθμούς.

Ο Schilling (1980) μελέτησε μια εναλλακτική προσέγγιση του δυναμικού προβλήματος χωροθέτησης, κατά την οποία μια πολυκριτηριακή διατύπωση μέγιστης κάλυψης προσπαθεί να ανακαλύψει ένα σύνολο από αποτελεσματικές λύσεις, από τις οποίες μπορεί να επιλεγεί κάποια για υλοποίηση. Η μαθηματική διατύπωση είναι :

$$\text{Maximize } \sum_i h_{it} Y_{it} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2.46)$$

subject to

$$\sum_{j \in N_{it}} X_{jt} \geq Y_{it} \quad \forall i, t, \quad (2.47)$$

$$\sum_j X_{jt} \geq P_t \quad \forall t = 1, \dots, T, \quad (2.48)$$

$$X_{jt} \geq X_{j,t-1} \quad \forall j, t = 2, \dots, T, \quad (2.49)$$

$$X_{jt} \in \{0,1\} \quad \forall j, t = 1, \dots, T, \quad (2.50)$$

$$Y_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i, t = 1, \dots, T. \quad (2.51)$$

όπου:

d_{ijt} = η ελάχιστη χωρική ή χρονική απόσταση από τον κόμβο i στον κόμβο j
τη χρονική περίοδο t

h_{it} = ζήτηση στον κόμβο i τη χρονική περίοδο t

P_t = αριθμός μονάδων που εργάζονται τη χρονική περίοδο t

$N_{it} = \{j | d_{ijt} \leq S\}$ = σύνολο μονάδων που μπορούν να καλύψουν τον κόμβο i
την χρονική περίοδο t

$$X_{jt} = \begin{cases} 1 & \text{αν η μονάδα εργάζεται στη θέση } j \text{ την περίοδο } t, \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

$$Y_{it} = \begin{cases} 1 & \text{αν ο κόμβος } i \text{ καλύπτεται την περίοδο } t, \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (2.46) είναι ουσιαστικά ένα διάνυσμα από T ξεχωριστές περιοδικές αντικειμενικές συναρτήσεις, που κατά βάσει δεν έχουν ένα μοναδικό βέλτιστο. Ο περιορισμός (2.47) καθορίζει αν η ζήτηση στον κόμβο i καλύπτεται από τουλάχιστον μια μονάδα που απέχει απόσταση S την χρονική περίοδο t , ενώ ο περιορισμός (2.48) δείχνει τον αριθμό των μονάδων που θα τοποθετηθούν την χρονική περίοδο t . Το πρότυπο υποθέτει (περιορισμό (2.49)) ότι αν μια μονάδα είναι ελεύθερη κάποια χρονική περίοδο, θα είναι ελεύθερη και σε όλες τις μελλοντικές χρονικές περιόδους.

Παρατηρείται ότι το πρότυπο του Schilling εκτός από τον περιορισμό (2.49) αποτελεί μια επέκταση του MCLP σε δυναμικές συνθήκες καθώς οι περιορισμοί (2.47), (2.48) καθώς και η αντικειμενική συνάρτηση (2.46) είναι πανομοιότυπες με τις (2.12), (2.13) και (2.11) αντίστοιχα.

Ίσως το πιο γενικευμένο δυναμικό πρότυπο χωροθέτησης αναπτύχθηκε από τους Gendreau et al. (2001) και χρησιμοποιεί το DSM που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2.2.3.3.2. Το *Δυναμικό Πρότυπο Διπλής Σταθεράς (Dynamic Double Standard Model)* εκτός από τις σταθερές κάλυψης και του περιορισμούς ικανότητας παροχής εξυπηρέτησης του DSM λαμβάνει υπόψη πρακτικές θεωρήσεις που ενυπάρχουν στην δυναμική φύση του προβλήματος:

- i. Δεν είναι εφικτό να είναι πάντα ίδιες, μονάδες που κινούνται σε επιτυχείς αναδιάρθρωσεις,
- ii. Πρέπει να αποφεύγονται επαναλαμβανόμενες κυκλικές διαδρομές μεταξύ των ίδιων δύο θέσεων εγκατάστασης μονάδας και
- iii. Πρέπει, επίσης, να αποτρέπονται μεγάλες διαδρομές μεταξύ των αρχικών και των τελικών θέσεων εγκατάστασης μονάδας (Schilling, 1980).

Η δυναμική όψη του προτύπου αναδιάρθρωσης καλύπτεται από σταθερές εξαρτώμενες από το χρόνο (M_{jt}^t), οι οποίες εξισώνονται με το κόστος επανατοποθέτησης των μονάδων. Αν η μονάδα παραμένει στην ίδια θέση την επόμενη χρονική περίοδο, τότε $M_{jt}^t = 0$. Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος είναι η εξής :

$$\text{Maximize } \sum_{i \in V} d_i x_i^2 - \sum_{j \in W} \sum_{l=1}^p M_{jl}^l y_{jl} \quad (2.52)$$

subject to

$$\sum_{j \in W_i^2} \sum_{l=1}^p y_{jl} \geq 1 \quad (i \in V), \quad (2.53)$$

$$\sum_{i \in V} d_i x_i^1 \geq a \sum_{i \in V} d_i, \quad (2.54)$$

$$\sum_{j \in W_i^1} \sum_{l=1}^p y_{jl} \geq x_i^1 + x_i^2 \quad (i \in V), \quad (2.55)$$

$$x_i^2 \leq x_i^1 \quad (i \in V), \quad (2.56)$$

$$\sum_{j \in W} y_{jl} = 1 \quad (l = 1, \dots, p), \quad (2.57)$$

$$\sum_{l=1}^p y_{jl} \leq p_j \quad (j \in W), \quad (2.58)$$

$$x_i^1, x_i^2 \in \{0, 1\} \quad (i \in V), \quad (2.59)$$

$$y_{jl} \in \{0, 1\} \quad (j \in W, l = 1, \dots, p). \quad (2.60)$$

όπου:

W = σύνολο δυνατών θέσεων μονάδων παροχής άμεσης βοήθειας (με δείκτη j)

V = σύνολο κόμβων ζήτησης παροχής υπηρεσίας (με δείκτη i)

$$W_i^1 = \{j \in W : t_{ij} \leq r_1\}$$

$$W_i^2 = \{j \in W : t_{ij} \leq r_2\}$$

$$\begin{aligned}
r_1, r_2 &= \text{προκαθορισμένες σταθερές χρονικής κάλυψης} \\
a &= \text{ελάχιστο ποσοστό ζήτησης που πρέπει να καλυφθεί σε χρόνο } r_1 \\
p &= \text{συνολικός αριθμός τοποθετούμενων μονάδων} \\
p_j &= \text{μέγιστος αριθμός τοποθετούμενων μονάδων στον κόμβο } j \\
d_i &= \text{ζήτηση για εξυπηρέτηση κόμβου } i \\
x_i^k &= \begin{cases} 1 & \text{αν η ζήτηση στον κόμβο } i \text{ καλύπτεται } k \text{ φορές σε χρόνο } r_1 \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \\
y_{jl} &= \begin{cases} 1 & \text{αν η μονάδα } l \text{ κινείται προς τη θέση } j \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}
\end{aligned}$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (2.52) μεγιστοποιεί τη ζήτηση που καλύπτεται διπλά μειωμένη κατά το κόστος ποινής για αναδιάρθρωση των μονάδων. Ο περιορισμός (2.53) εκφράζει τις απαιτήσεις καλύψεις εντός χρόνου r_2 , ενώ οι περιορισμοί (2.54), (2.55) και (2.56) είναι ίδιοι με τους (2.39), (2.40) και (2.41) του DSM. Ο περιορισμός (2.57) καθορίζει ότι κάθε μονάδα μπορεί να τοποθετηθεί μόνο σε μία θέση κάθε χρονική περίοδο t , ενώ ο (2.58) θέτει ένα άνω όριο στον αριθμό των μονάδων που μπορούν να τοποθετηθούν σε κάθε θέση.

Για την επίλυση του DDSM^t οι Gendreau et al. ανέπτυξαν ένα γρήγορο tabu αναζήτησης ευρεστικό αλγόριθμο αναζήτησης (fast tabu search heuristic) εκτελούμενο σε παράλληλους επεξεργαστές. Το πρότυπο εφαρμόστηκε χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα από το νησί του Montreal. Για τη λύση του προβλήματος δημιουργήθηκαν τυχαία από τις 5 έως τις 12 τα μεσάνυχτα 120 και 140 κλήσεις για άμεση επέμβαση. Το νησί χωρίστηκε σε 2521 κόμβους ζήτησης, οι οποίοι εξυπηρετούνταν από 40 έως 51 ασθενοφόρα. Τα αποτελέσματα του προτύπου ήταν αρκετά ικανοποιητικά αφού έδειξαν ότι ο ευρεστικός αλγόριθμος αναζήτησης ήταν σε θέση να υπολογίζει την επανατοποθέτηση των οχημάτων στο 95% των περιπτώσεων (Gendreau et al., 2001).

2.3.3 Πιθανοτικά πρότυπα χωροθέτησης

2.3.3.1 Συνήθεις Διατυπώσεις

Ο Daskin (1983) προέβαλλε το Πρόβλημα Χωροθέτησης Μέγιστου Ορίου Αναμενόμενης Κάλυψης (*Maximum Expected Coverage Location Problem*), το οποίο αφορούσε την αντιμετώπιση της συμφοράς των μονάδων άμεσης βοήθειας με ένα

πιθανοτικό πρότυπο βελτιστοποίησης. Επεχείρησε, δηλαδή, να βελτιώσει την προσδοκώμενη κάλυψη σε περίπτωση που οι μονάδες είναι απασχολημένες και μη διαθέσιμες με μια υπολογίσιμη για το σύστημα πιθανότητα q . Εν συντομία, το MEXCLP μπορεί να διατυπωθεί ως εξής: Ζητείται η χωροθέτηση p μονάδων παροχής άμεσης βοήθειας σε δυνατές θέσεις σε ένα δίκτυο ώστε να μεγιστοποιηθεί ο πληθυσμός που αναμένεται να εξυπηρετηθεί εντός δοθείσας χρονικής απόστασης r και δοθείσας της πιθανότητας κάθε όχημα να είναι μη διαθέσιμο. Κρίσιμο στη διατύπωση του Daskin είναι το γεγονός ότι αν m μονάδες μπορούν να καλύψουν ένα σημείο γεωγραφικά ($t_{ij} < r$) και ότι κάθε μονάδα είναι απασχολημένη με πιθανότητα q , τότε η πιθανότητα το σημείο να καλύπτεται από τουλάχιστον μία μονάδα είναι $1 - q^m$. Ο Daskin μεγιστοποίησε την προσδοκώμενη κάλυψη ως εξής:

$$\text{Maximize } \sum_{i \in V} \sum_{k=1}^p d_i (1-q) q^{k-1} y_{ik} \quad (2.61)$$

subject to

$$\sum_{j \in W_i} x_j - \sum_{k=1}^p y_{ik} \geq 0 \quad (i \in V), \quad (2.62)$$

$$\sum_{j \in W} x_j \leq p, \quad (2.63)$$

$$x_j \text{ ακέραιος } (j \in W), \quad (2.64)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\} \quad (i \in V, k=1, \dots, p). \quad (2.65)$$

όπου:

W = σύνολο δυνατών θέσεων μονάδων παροχής υπηρεσιών (με δείκτη j)

V = σύνολο κόμβων ζήτησης παροχής υπηρεσίας (με δείκτη i)

$$W_i = \{j \in W : t_{ij} \leq r\}$$

t_{ij} = χρόνος συντομότερης διαδρομής από κόμβο i σε συνεργείο j

r = προκαθορισμένη σταθερά χρονικής κάλυψης (*preset coverage standard*)

p = μέγιστος αριθμός μονάδων

q = πιθανότητα η κάθε μονάδα να είναι μη διαθέσιμη

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{αν το κινητό συνεργείο τοποθετείται στο κόμβο } j, \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{αν ο κόμβος } i \text{ καλύπτεται από τουλάχιστον } k \text{ μονάδες,} \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (2.61) μεγιστοποιεί την προσδοκώμενη ζήτηση για εξυπηρέτηση που μπορεί να καλυφθεί εντός χρόνου t , ο περιορισμός (2.62) υπολογίζει τις φορές που ο κόμβος j καλύπτεται και συσχετίζει τις μεταβλητές απόφασης y_{ik} με το σύνολο των μεταβλητών απόφασης x_j . Ο περιορισμός (2.63) καθορίζει το μέγιστο αριθμό μονάδων που τοποθετούνται στο δίκτυο, ενώ ο περιορισμός (2.64) επιτρέπει την τοποθέτηση περισσότερων της μιας μονάδας σε ένα κόμβο. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το MEXCLP μπορεί να επαναδιατυπωθεί χρησιμοποιώντας λιγότερο αριθμό μεταβλητών και μη γραμμική αντικειμενική συνάρτηση. Τότε το πρόβλημα διατυπώνεται ως εξής:

$$\text{Maximize } \sum_{i \in V} d_i (1 - q^{y_i}) \quad (2.66)$$

subject to

$$\sum_{j \in W_i} x_j = y_i, \quad (2.67)$$

$$\sum_{j \in W} x_j \leq p, \quad (2.68)$$

$$x_j, y_j \text{ ακέραιοι } (j \in W). \quad (2.69)$$

Παρ' όλο που οι δύο ανωτέρω διατυπώσεις είναι θεωρητικά ταυτόσημες, η μη γραμμική διατύπωση του MEXCLP προσαρμόζεται ευκολότερα για χρήση μέσω γενετικών αλγορίθμων (GA). Η αντικειμενική συνάρτηση (2.66) μπορεί απευθείας να κωδικοποιηθεί ως συνάρτηση φόρμα (fitness function). Είναι πιο εύκολο και ακόμη πιο αποτελεσματικό, δοθείσας μιας εφικτής λύσης, να υπολογίσει τις φορές που κάθε κόμβος καλύπτεται με ένα ανυσματικό πολλαπλασιασμό υπό περιορισμούς (conditional vector multiplication). Το MEXCLP εφαρμόστηκε στην πόλη της

Bangkok από τους Fujiyama et al. (1987). Οι συγγραφείς έλυσαν το πρόβλημα για μεταβλητό αριθμό παροχέων από 10 έως 30 και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι μειώνοντας τον αριθμό των παροχέων από 21 σε 15 ο μέσος χρόνος επέμβασης και η προσδοκώμενη κάλυψη δεν μεταβάλλονται ιδιαίτερα.

Οι ReVelle και Hogan (1989) ανέπτυξαν τη διατύπωση του MCLP παίρνοντας ως δυνατή την πιθανότητα ύπαρξης συμφόρησης σε συστήματα άμεσης επέμβασης. Διατύπωσαν το Πρόβλημα Χωροθέτησης Μέγιστης Διαθεσιμότητας (Maximum Availability Location Problem) υποθέτοντας ενιαία εκτίμηση του συντελεστή απασχόλησης κάθε μονάδας. Σε αναλογία με την εκτίμηση του Daskin στο MEXCLP ο τοπικός συντελεστής απασχόλησης γύρω από τον κόμβο i , q_i δίνεται από τη σχέση:

$$q_i = \frac{\bar{t} \sum_{k \in M_i} f_k}{24 \sum_{j \in W_i} x_j} \quad (2.70)$$

Το πρότυπο δέχεται ότι η περιοχή W_i είναι μια απομονωμένη ομογενής γεωγραφική περιοχή, όπου όλες οι μονάδες είναι πανομοιότυπες ως προς τον μέσο χρόνο εξυπηρέτησης, οπότε η σχέση (2.70) που εκφράζει το ποσοστό του χρόνου στον οποίον ένας τουλάχιστον πάροχος είναι απασχολημένος είναι :

$$q_i = \frac{\lambda_i}{(s\mu_i)} = \frac{\rho_i}{s} \quad (2.71)$$

Η παράμετρος λ_i εκφράζει τον ρυθμό άφιξης των κλήσεων για επέμβαση στην περιοχή i , ενώ το $1/\mu_i$ το μέσο χρόνο εξυπηρέτησης. Το ρ_i είναι ο συντελεστής απασχόλησης της μονάδας i και s είναι ο αριθμός των παροχέων στο σύστημα. Το πρότυπο θέτει ως κανόνα να υπάρχει διαθέσιμος ένας τουλάχιστον πάροχος, όταν υπάρξει κλήση για επέμβαση με πιθανότητα τουλάχιστον a . Έτσι προκύπτει η σχέση:

$$1 - q_i^{\sum_{j \in W_i} x_j} \geq a \quad (i \in V) \quad (2.72)$$

Ο ελάχιστος αριθμός μονάδων που απαιτείται για να καλύψει τη ζήτηση με αξιοπιστία a έχει δειχθεί ότι είναι ο μικρότερος ακέραιος b_i που ικανοποιεί τη σχέση (ReVelle και Hogan, 1988):

$$1 - (\rho_i / b_i)^{b_i} \geq a \quad (2.73)$$

Οι ReVelle και Hogan παρουσίασαν δύο πρότυπα βασισμένα στην παραπάνω λογική. Το πρώτο (*MALP I*) χρησιμοποιεί ενιαίο συντελεστή απασχόλησης για όλο το σύστημα, ενώ το δεύτερο (*MALP II*) κάνει χρήση του τοπικού συντελεστή απασχόλησης. Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος *MALP II* είναι :

$$\text{Maximize } \sum_{i \in V} d_i y_{ib_i} \quad (2.74)$$

subject to

$$\sum_{k=1}^{b_i} y_{jk} \leq \sum_{j \in W_i} x_j \quad (i \in V), \quad (2.75)$$

$$y_{ik} \leq y_{i,k-1} \quad (i \in V, k = 2, \dots, b_i), \quad (2.76)$$

$$\sum_{j \in W} x_j = p, \quad (2.77)$$

$$x_j \text{ ακέραιος } (j \in W), \quad (2.78)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\} \quad (i \in V, k = 1, \dots, p). \quad (2.79)$$

όπου:

W = σύνολο κόμβων, όπου μπορεί να τοποθετηθεί μονάδα (με δείκτη j)

V = σύνολο κόμβων ζήτησης (με δείκτη i)

x_j = ακέραια μεταβλητή που δηλώνει τον αριθμό των μονάδων που τοποθετούνται στον

κόμβο j

\bar{t} = η μέση διάρκεια εξυπηρέτησης ενός συμβάντος

f_k = συχνότητα κλήσεων για επέμβαση στον κόμβο k ανά ημέρα

$$M_i = \{k | t_{ki} \leq S\}$$

$$W_i = \{j | t_{ji} \leq S\}$$

p = αριθμός μονάδων που θα τοποθετηθούν

$$y_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{αν ο κόμβος } i \text{ καλύπτεται από τουλάχιστον } k \text{ μονάδες,} \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

Στην αντικειμενική συνάρτηση (2.74) ο αριθμός των κλήσεων της περιοχής που καλύπτεται τουλάχιστον b_i φορές αυξάνεται με επίπεδο αξιοπιστίας τουλάχιστον a . Ο περιορισμός (2.75) υποδηλώνει ότι ο κόμβος i καλύπτεται b_i φορές μόνο αν τουλάχιστον b_i μονάδες έχουν τοποθετηθεί μέσα στα δοθέντα χρονικά όρια. Ο περιορισμός (2.76) δηλώνει ότι ο κόμβος k μπορεί να καλύπτεται k φορές, μόνο αν έχει καλυφθεί και $k-1$ φορές, ενώ τέλος ο περιορισμός (2.77) καθορίζει τον αριθμό των μονάδων που θα τοποθετηθούν. Όσον αφορά το *MALP I* η μαθηματική διατύπωση είναι ακριβώς η ίδια, με μόνη διαφοροποίηση ότι αντί για τους συντελεστές b_i , χρησιμοποιείται ενιαίος συντελεστής b που είναι ο μικρότερος ακέραιος που ικανοποιεί τη σχέση:

$$\log(1-a)/\log q \leq b \quad (2.80)$$

2.3.3.2 Πρότυπα χωρικών ουρών

Τα πρότυπα και οι μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 2.3.1 ενσωματώνουν έναν αριθμό στοχαστικών (πιθανοτικών) παραμέτρων. Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστεί πως οι πιθανοτικές κατανομές που σχετίζονται με αυτές τις παραμέτρους συνδυάζονται με αποτελέσματα από τη θεωρία ουρών για να εξετάσουν επιπρόσθετες όψεις της τοποθεσιολογίας.

Το υπερκυβικό πρότυπο (*hypercube model*) του Larson (1974) ήταν το πρώτο που ενέπλεξε την θεωρία χωρικών ουρών (*spatial queues*) στα προβλήματα χωροθέτησης. Στο αρχικό πρότυπο, ο Larson μελετά προβλήματα που σχετίζονται με τη χωροθέτηση μονάδων εξυπηρέτησης, καθώς και πλάνο επέμβασης των περιοχών ανταπόκρισης σε συστήματα παροχής άμεσης βοήθειας. Λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις επεμβάσεις που μπορεί να γίνουν στην περιοχή ευθύνης κάθε μονάδας όσο και εκτός περιοχής ευθύνης, πιθανοτικές αφίξεις κλήσεων για επείγουσα ανάγκη και μεταβλητούς χρόνους επέμβασης, ο Larson σχεδίασε το επείγουσας ανάγκης σύστημα εξυπηρέτησης ως ένα σύστημα ουράς πολλαπλών

παροχών εξυπηρέτησης με διακριτούς παροχείς (*multi-server queuing system with distinguishable servers*).

Πιο συγκεκριμένα, ο συγγραφέας υποθέτει τυχαίες αφίξεις κλήσεων για την παροχή βοήθειας και εκθετικούς χρόνους εξυπηρέτησης, αφού, ασφαλώς, δοθεί γεωγραφική ανάλυση της περιοχής μελέτης και ένα κριτήριο αποστολής πάροχο, ο Larson ανέπτυξε μία επαναληπτική μέθοδο για να παράγει τον μεταβατικό πίνακα (*transition matrix*) της διαδικασίας Markov. Ο χώρος της διαδικασίας αυτής είναι απεικονίζεται ως οι κορυφές ενός N -διάστατου υπερκύβου (όπου N ο αριθμός των παροχών), όπου κάθε κορυφή αντιπροσωπεύει ένα συνδυασμό των διαθέσιμων για επέμβαση παροχών του συστήματος. Αυτό το πρότυπο στη συνέχεια χρησιμοποιείται για να παράγει έναν αριθμό εκτιμητών της απόδοσης του συστήματος. Το υπερκυβικό πρότυπο του Larson έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές ευρεστικές διαδικασίες προκειμένου να βρεθεί λύση για πληθώρα προβλημάτων χωροθέτησης με θεωρία ουρών.

Μια εφαρμογή του υπερκυβικού προτύπου του Larson χρησιμοποιείται από τους Marianon και ReVelle (1996) για την επέκταση του Προβλήματος Χωροθέτησης Μέγιστης Διαθεσιμότητας (MALP) στο Πρόβλημα Χωροθέτησης Μέγιστης Διαθεσιμότητας με Ουρές αναμονής (*Queueing Maximum Availability Location Problem*). Η βασική διάκριση μεταξύ του παρόντος προτύπου QMALP και του MALP έχει σχέση με την μεθοδολογία που ακολουθείται στον προσδιορισμό των συντελεστών b_i . Μια δεύτερη διαφορά εντοπίζεται στην μεταχείριση των χρόνων διαδρομής, οι οποίοι στο QMALP δεν είναι σταθεροί, αλλά ακολουθούν κάποια πιθανοτική κατανομή. Δυο σημαντικές υποθέσεις γίνονται στο πρότυπο :

- a. Μία περιοχή i και οι περιοχές που συνορεύουν με αυτήν δε διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό αναφορικά με τους ρυθμούς κλήσεων για εξυπηρέτηση.
- β. Για την εξυπηρέτηση του συμβάντος στον τόπο του ατυχήματος οι χρόνοι είναι μεγάλοι σχετικά με τους χρόνους διαδρομής.

Οι δύο αυτές υποθέσεις οδηγούν στο συμπέρασμα ότι κάθε υποπεριοχή (γειτονιά) του δικτύου λειτουργεί ως μια απομονωμένη ανεξάρτητη μονάδα που η ζήτηση της δεν επηρεάζει τους χρόνους εξυπηρέτησης της γειτονικής περιοχής. Αυτή η 'γειτονιά' συμπεριφέρεται ως ένα $M/G/s$ -loss σύστημα, δηλαδή υποθέτεται τυχαία (Poisson) κατανομή αφίξεων, γενική κατανομή χρόνου εξυπηρέτησης και s παροχείς εξυπηρέτησης, ενώ αν υπάρξει κλήση για επέμβαση όταν και οι s παροχείς είναι μη διαθέσιμοι, οι κλήσεις χάνονται (στην πραγματικότητα εξυπηρετούνται τα περιστατικά από παροχείς εκτός γειτονιάς). Εφαρμόζοντας τις εξισώσεις σταθερής

κατάστασης της κανονικής θεωρίας ουρών προκύπτει ότι η πιθανότητα και οι s παροχείς της γειτονιάς i να είναι απασχολημένοι δίνεται από τη σχέση :

$$p_s = \frac{(1/s!) \rho_i^{b_i}}{\sum_{m=0}^s \frac{\rho_i^m}{m!}} \quad (2.81)$$

Η πιθανότητα αυτή είναι φθίνουσα συνάρτηση της παραμέτρου s καθώς η εντός παρένθεσης ποσότητα της σχέσης (2.82), που παρουσιάζει τον s -οστό όρο της ακολουθίας p συναρτήσει του προηγούμενου, είναι αυστηρά μικρότερη του 1.

$$p_s = \left(\frac{1}{p_{s-1} + s\mu_i / \lambda_i} \right) p_{s-1} \quad (2.82)$$

Η πιθανότητα συνεπώς ένας τουλάχιστον πάροχος να είναι διαθέσιμος, είναι όπως και στη σχέση (2.72) $1-p_s$ και εφόσον απαιτείται η πιθανότητα αυτή να είναι τουλάχιστον a προκύπτει $1-p_s > a$. Αφού όπως προαναφέρθηκε το p_s είναι φθίνουσα συνάρτηση του s υπάρχει ακέραιος b_i έτσι ώστε να ισχύουν συγχρόνως:

$$s \geq b_i \quad \text{και} \quad 1 - p_s > a \quad (2.83)$$

Αυτός ο αριθμός αντιπροσωπεύει όπως και στο MALP τον ελάχιστο αριθμό μονάδων που απαιτείται για να καλύψει τη ζήτηση με αξιοπιστία a και είναι ο μικρότερος ακέραιος που επαληθεύει τη σχέση:

$$\frac{(1/b_i!) \rho_i^{b_i}}{\sum_{m=0}^{b_i} \frac{\rho_i^m}{m!}} \leq 1 - a \quad (2.84)$$

Ουσιαστικά το πρότυπο αυτό υπολογίζει πιο ξεκάθαρα πόσες φορές και από ποιον πρέπει να καλύπτεται κάθε υποπεριοχή του δικτύου ώστε με μια πιθανότητα a να

μην αναμένει στην ουρά για εξυπηρέτηση ο καλών. Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος είναι :

$$\text{Maximize } \sum_{i \in V} f_i y_{ib_i} \quad (2.85)$$

subject to

$$\sum_{k=1}^{b_i} y_{jk} \leq \sum_{j \in W_i} \sum_{k=1}^{C_j} x_{kj} \quad (i \in V), \quad (2.86)$$

$$y_{ik} \leq y_{i,k-1} \quad (i \in V, k = 2, \dots, b_i), \quad (2.87)$$

$$\sum_{j \in W_i} \sum_{k=1}^{C_j} x_{kj} = p, \quad (2.88)$$

$$x_{kj} \in \{0,1\} \quad (j \in W, k = 1, \dots, C_j), \quad (2.89)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\} \quad (i \in V, k = 1, \dots, p). \quad (2.90)$$

όπου:

W = σύνολο κόμβων, όπου μπορεί να τοποθετηθεί μονάδα (με δείκτη j)

V = σύνολο κόμβων ζήτησης (με δείκτη i)

x_j = ακέραια μεταβλητή που δηλώνει τον αριθμό των μονάδων που τοποθετούνται στον

κόμβο j

\bar{t} = η μέση διάρκεια εξυπηρέτησης ενός συμβάντος

f_k = συχνότητα κλήσεων για επέμβαση στον κόμβο k ανά ημέρα

C_j = χωρητικότητα κόμβου j

$W_i = \{j | t_{ji} \leq S\}$

p = αριθμός μονάδων που θα τοποθετηθούν

$x_{kj} = \begin{cases} 1 & \text{αν ο } k\text{-οστός παροχέας τοποθετείται στον κόμβο } i, \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{αν ο κόμβος } i \text{ καλύπτεται από τουλάχιστον } k \text{ μονάδες,} \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (2.85) καθώς και οι περιορισμοί (2.86), (2.87) και (2.88) είναι ταυτόσημοι με τους (2.74), (2.75), (2.76) και (2.77) αντίστοιχα του MALP. Το πρότυπο εφαρμόστηκε στο δίκτυο 55 κόμβων του Swain (1971). Ο μέσος αριθμός κλήσεων ανά κόμβο ορίστηκε στις 0,4 κλήσεις ανά ώρα. Ο μέσος ρυθμός εξυπηρέτησης θεωρήθηκε 45 λεπτά και το πρότυπο λύθηκε με Branch and Bound μέθοδο στο προγραμματιστικό πακέτο Lindo.

Το πρότυπο QMALP είναι από τα πιο εξελιγμένα πρότυπα χωροθέτησης που έχουν δημιουργηθεί. Το πρότυπο αυτό έχει τη δυνατότητα να δίνει μεγάλης ακρίβειας λύσεις και να προσεγγίζει ένα χωρικό σύστημα παροχών. Το πρότυπο όμως εμφανίζεται αμφίβολης ακρίβειας, όταν οι δύο υποθέσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω δεν τηρούνται. Ιδίως η υπόθεση (ii) που σχετίζεται με τους χρόνους εξυπηρέτησης και υιοθετήθηκε και από το Larson στο υπερκυβικό πρότυπο, σε πληθώρα προβλημάτων δεν είναι αντικειμενική, επειδή ο χρόνος που σπαταλάται στον τόπο της επέμβασης πιθανότατα να είναι αρκετά σημαντικός σε σχέση με το χρόνο διαδρομής.

Επειδή στο σύννητες MCLP των Church και ReVelle (1974) δεν μπορεί να γίνει μετατροπή ούτως ώστε να προσαρμόζεται στον περιορισμό της συμφόρησης ενός συστήματος, οι Marianon και Serra (1998) παρουσίασαν το *Μέγιστης Κάλυψης Πρόβλημα Χωροθέτησης με Ουρές Αναμονής (Queueing Maximal Covering Location-Allocation Problem)*. Το QM-CLAM μπορεί να διατυπωθεί ως εξής: Ζητείται η χωροθέτηση p μονάδων έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί ο καλυπτόμενος πληθυσμός, όταν η κάλυψη ορίζεται ως: i) ο καλυπτόμενος πληθυσμός κατανέμεται γύρω από ένα σύστημα παροχών απέχοντας χρόνο ή απόσταση το πολύ S από τον κοντινότερο παροχέα, και ii) αν ένας χρήστης 'καλύπτεται' από την κοντινότερη μονάδα, δεν θα περιμένει στην ουρά αναμονής περισσότερο από τ με πιθανότητα τουλάχιστον a . Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος είναι :

(QM-CLAM)

$$\text{Maximize } \sum_{i,j} a_i x_{ij} \quad (2.91)$$

subject to

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i, j \quad (2.92)$$

$$\sum_j x_{ij} \leq 1 \quad \forall i \quad (2.93)$$

$$\sum_i y_i = p, \quad (2.94)$$

$$\sum_{i \in I} f_i x_{ij} \leq \mu_j + \frac{1}{\tau} \ln(1-a), \quad \forall j \quad (2.95)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad j \in N_i \quad \forall i, j \quad (2.96)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad \forall j \quad (2.97)$$

όπου:

J = σύνολο κόμβων, όπου μπορεί να τοποθετηθεί μονάδα (με δείκτη j)

I = σύνολο κόμβων ζήτησης (με δείκτη i)

μ_j = μέση τιμή της κατανομής του χρόνου εξυπηρέτησης του παροχέα j

τ = μέγιστος χρόνος αναμονής στην ουρά για εξυπηρέτηση

f_i = μέση τιμή κατανομής Poisson του ρυθμού άφιξης των κλήσεων για επέμβαση

a_i = πληθυσμός κόμβου i

p = αριθμός τοποθετούμενων παροχέων

a = πιθανότητα που δηλώνει την αξιοπιστία του συστήματος

$$N_i = \{j | t_{ji} \leq S\}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{αν ο χρήστης στον κόμβο } i \text{ εξυπηρετείται από τον παροχέα στον κόμβο } j \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

$$y_j = \begin{cases} 1 & \text{αν ένας παροχέας τοποθετείται στον κόμβο } j, \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (2.91) μεγιστοποιεί τον καλυπτόμενο πληθυσμό όπως ορίστηκε η κάλυψη στην διατύπωση του προβλήματος. Ο περιορισμός (2.92) δηλώνει ότι δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί ένας χρήστης από ένα κόμβο στον οποίον

δεν έχει τοποθετηθεί παροχέας, ενώ ο περιορισμός (2.93) επιβάλλει ότι κάθε χρήστης κατανέμεται το πολύ σε ένα παροχέα. Ο περιορισμός (2.94) καθορίζει τον αριθμό των παροχέων που θα τοποθετηθούν στο δίκτυο και ο περιορισμός (2.95) υποχρεώνει ο χρόνος που σπαταλάται από ένα χρήστη στην ουρά αναμονής να μην είναι μεγαλύτερος από τ με πιθανότητα α . Οι συγγραφείς επιλύουν το πρότυπο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο κλάδου και φράγματος (Branch and Bound) καθώς και ευρεστικές μεθόδους σε ένα δίκτυο 30 κόμβων όπου ο μέσος χρόνος επέμβασης είναι 20 λεπτά. (Marianon και Serra, 1998).

2.3.3 Πρότυπα σχεδιασμού σεναρίων

Ο σχεδιασμός σεναρίων (scenario planning) είναι ένας τρόπος να λαμβάνονται αποφάσεις άμεσα για την αντιμετώπιση προβλημάτων που διακρίνονται από μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας προδιαγράφοντας έναν αριθμό πιθανών μελλοντικών καταστάσεων. Με τη βοήθεια της αντικειμενικής συνάρτησης, γίνεται προσπάθεια για την εξεύρεση λύσεων, οι οποίες να είναι κατά το δυνατό αποτελεσματικές σε όλα τα σενάρια. Συγκεκριμένα, στα προβλήματα χωροθέτησης, σκοπός της μεθόδου είναι η επιχείρηση δημιουργίας ενός συνόλου σεναρίων που θα ασχολείται με τις πιθανές συμπεριφορές άγνωστων παραμέτρων του προβλήματος, έτσι ώστε να καθοριστεί μια λύση κατανομής των παροχέων στο σύστημα που θα πλησιάζει τη βέλτιστη.

Για να διευκρινιστεί πώς διατυπώνονται οι σκοποί της μεθόδου θα μελετηθεί το πρόβλημα p -διαμέσου που αναπτύσσεται στην παράγραφο 2.2.2 με προσέγγιση σχεδιασμού σεναρίων (P-median problem under the scenario planning approach). Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος είναι η εξής:

$$\text{Minimize } \sum_k q_k R_k \quad (2.98)$$

subject to

$$\sum_j X_j = P, \quad (2.99)$$

$$\sum_j Y_{ijk} = 1 \quad \forall i, k, \quad (2.100)$$

$$Y_{ijk} - X_j \leq 0 \quad \forall i, j, k, \quad (2.101)$$

$$R_k - \left(\sum_i \sum_j h_{ik} d_{ijk} Y_{ijk} - V_k \right) = 0 \quad \forall k, \quad (2.102)$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall j, \quad (2.103)$$

$$Y_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k. \quad (2.104)$$

όπου:

k = δείκτης των πιθανών σεναρίων

V_k = η βέλτιστη λύση του προβλήματος p -διαμέσου για το σενάριο k

d_{ijk} = η ελάχιστη χωρική ή χρονική απόσταση από τον κόμβο i στον κόμβο j
στο σενάριο k

h_{ik} = ζήτηση στον κόμβο i στο σενάριο k

P_t = αριθμός μονάδων που θα τοποθετηθούν

$R_k = V_k - \hat{V}_k$, όπου V_k η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος
 p -διαμέσου της επιλεγείσας λύσης

$Y_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{αν ο χρήστης στον κόμβο } i \text{ εξυπηρετείται από τη μονάδα στη θέση } j \text{ στο σενάριο } k \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$

$X_j = \begin{cases} 1 & \text{αν τοποθετηθεί μονάδα στον κόμβο } j, \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$

Η αντικειμενική συνάρτηση (2.98) ελαχιστοποιεί το σταθμισμένο άθροισμα των αποκλίσεων της επιλεγείσας λύσης από τη βέλτιστη του κάθε σεναρίου. Οι περιορισμοί (2.99), (2.100) και (2.101) είναι οι περιορισμοί του προβλήματος p -διαμέσου για το σύνολο των σεναρίων, ενώ ο περιορισμός (2.102) ορίζει τη μεταβλητή R_k του προβλήματος.

Στην πραγματικότητα, τα πρότυπα σχεδιασμού σεναρίων είναι πρότυπα πρόβλεψης διαφόρων μελλοντικών καταστάσεων. Έχουν ως σκοπό τους την περιγραφή βασικών μεταβλητών των παραμέτρων ενός προβλήματος χωροθέτησης μέσω ποσοτικών χαρακτηρισμών. Για το λόγο αυτό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ένα χρήσιμο εργαλείο σε περιπτώσεις έλλειψης στοιχείων κάποιων παραμέτρων

του προβλήματος χωροθέτησης. Οι Serra και Marianon (1992) εφάρμοσαν τη μέθοδο αυτή επίλυσης για τη χωροθέτηση πυροσβεστικών οχημάτων στην πόλη της Barcelona. Τα σενάρια χρησιμοποιήθηκαν για να καλύψουν διαφορετικές συνθήκες ζήτησης και χρόνου διαδρομής.

2.3. Συμπεράσματα

Βασικός σκοπός αυτού του κεφαλαίου ήταν η παρουσίαση της βιβλιογραφίας αναφορικά με τη χωροθέτηση μονάδων εκτάκτων αναγκών τόσο σε γραμμικά συγκοινωνιακά έργα όσο και σε γενικότερες περιοχές κάλυψης. Παρουσιάστηκαν τα σημαντικότερα και τα πιο ευρέως διαδεδομένα πρότυπα χωροθέτησης. Στο τελευταίο αυτό μέρος του κεφαλαίου 2 συγκεντρώνονται τα ευρήματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης και αναφέρονται κάποια γενικά συμπεράσματα για τα πρότυπα χωροθέτησης, πάνω στα οποία θα στηριχτεί η ανάπτυξη της μεθοδολογίας της παρούσης διπλωματικής εργασίας.

Τα αρχικά πρότυπα που αναπτύχθηκαν ήταν ουσιαστικά στατικά και δεν ασχολούνται αρκετά ούτε με τον δυναμικό χαρακτήρα των πραγματικών περιστατικών ούτε με το γεγονός ότι ορισμένες κλήσεις είναι δυνατόν να μην μπορούν να εξυπηρετηθούν εντός του προκαθορισμένου χρόνου, καθώς ο παροχέας δεν είναι διαθέσιμος. Ωστόσο, τα πρώιμα αυτά πρότυπα κατέστησαν τη βάση για τα επόμενα πιο πολύπλοκα και με μεγαλύτερη ακρίβεια πρότυπα. Γιατί, ασφαλώς, με την ανάπτυξη δυναμικών προτύπων ως προς το χρόνο αντιμετωπίστηκε το θέμα σχετικά με τη μεταβολή ως προς τον χρόνο κάποιων παραμέτρων και, επιπλέον, αντιμετωπίστηκε και το ζήτημα της μεταβολής ως προς τον χρόνο κάποιων παραμέτρων του συστήματος, τα οποία λύνουν επαναλαμβανόμενα το πρόβλημα ανά τακτές χρονικές περιόδους αναδιατάσσοντας τις θέσεις των μονάδων. Αφετέρου, το ζήτημα της μη διαθεσιμότητας αντιμετωπίστηκε με δύο διαφορετικές προσεγγίσεις :

- α. Τα ντετερμινιστικά πρότυπα, τα οποία αναζητούν λύσεις όπου η ζήτηση των σημείων υπερκαλύπτεται χωρίς όμως να μελετάται άμεσα η ακριβής διαθεσιμότητα των μονάδων.
- β. Τα πιθανοτικά πρότυπα, τα οποία εκμεταλλεύονται τον συντελεστή απασχόλησης των μονάδων και ελέγχουν άμεσα την διαθεσιμότητα των μονάδων.

Τα ντετερμινιστικά πρότυπα έμμεσου ελέγχου της διαθεσιμότητας, βασίζονται στη λογική ότι οι περιοχές αυξημένης ζήτησης που εξυπηρετούνται από

περισσότερες από μία μονάδες έχουν μικρότερη πιθανότητα να είναι όλες οι μονάδες απασχολημένες σε περίπτωση συμβάντος.

Πρέπει να σημειωθεί το γεγονός ότι τα πρώτα πιθανοτικά πρότυπα υπολογίζουν πολύ προσεγγιστικά το συντελεστή απασχόλησης όλου του συστήματος. Η λογική όμως αυτή αν και είναι σε θέση να δίνει σωστά αποτελέσματα σε περιπτώσεις ομοιογενών δικτύων ως προς τη ζήτηση, οδηγεί σε λάθος αποτελέσματα σε περιπτώσεις δικτύων, στις οποίες η ζήτηση είναι ποικίλη, όπως συνήθως συμβαίνει στην πραγματικότητα. Η αδυναμία αυτή αντιμετωπίστηκε με χρήση θεωρίας χωριών ουρών για τον υπολογισμό του συντελεστή απασχόλησης της κάθε μονάδας, οι οποίες λειτουργούν ως ένα ενιαίο σύστημα προσφοράς και ζήτησης και όχι μία ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες μονάδες.

Στα τελευταία αυτά πρότυπα υποθέτουμε ότι ο χρόνος επέμβασης (διαδρομής) δεν είναι υπολογίσιμος συγκριτικά με το χρόνο εξυπηρέτησης στον τόπο του συμβάντος, οπότε θεωρούμε ότι ο συνολικός χρόνος απασχόλησης του παροχέα ακολουθεί την ίδια κατανομή για όλες τις μονάδες. Ενώ όμως η υπόθεση αυτή είναι αρκετά χρήσιμη και σχετική με πραγματικά γεγονότα σε σταθμούς πυρόσβεσης, σε περιπτώσεις όπως συστήματα ασθενοφόρων σε αστικά δίκτυα ή συνεργεία άμεσης επέμβασης κατά μήκος αυτοκινητοδρόμων, η υπόθεση αυτή περιέχει ένα ποσοστό σημαντικού ίσως σφάλματος, το οποίο μάλιστα υποδιαστασιολογεί το πρόβλημα. Στον πίνακα 2.2 συνοψίζονται τα κυριότερα στοχαστικά πρότυπα της βιβλιογραφίας.

Στο επόμενο κεφάλαιο αναπτύσσεται μια μεθοδολογία που χρησιμοποιεί πολλά από τα εργαλεία των προτύπων αυτής της ανασκόπησης αλλά και πρωτότυπες τεχνικές και θεωρίες προσπαθώντας να προσεγγίσει όσον το δυνατόν ακριβέστερα το πρόβλημα χωροθέτησης μονάδων παροχής άμεσης βοήθειας.

Πίνακας 2.2 : Σύνοψη στοχαστικών προτύπων

Τύπος	Συγγραφείς	Χρονολογία	Πρότυπο	Αντικειμενική Συνάρτηση
Δυναμικά πρότυπα	Schilling	1980	DMCLP	Μεγιστοποιεί δυναμικά την κάλυψη της ζήτησης
	Gendreau	2001	DDSM ^t	Μεγιστοποιεί δυναμικά την κάλυψη της ζήτησης τουλάχιστον διπλά σε r_1 μειωμένη με ποινή λόγω αναδιάταξης
Πιθανοτικά πρότυπα	Larson	1974	Hypercube	Περιγράφει λεπτομερώς την κατάσταση του συστήματος χωρικών ουρών
	Daskin	1983	MEXCLP	Μεγιστοποιεί την προσδοκώμενη κάλυψη της ζήτησης με ενιαίο συντελεστή απασχόλησης
	Batta et al.	1989	AMEXCLP	Μεγιστοποιεί την προσδοκώμενη κάλυψη της ζήτησης με διόρθωση για τον ενιαίο συντελεστή απασχόλησης
	ReVelle και Hogan	1989	MALP I,II	Μεγιστοποιεί την ολική κάλυψη της ζήτησης με πιθανότητα τουλάχιστον a
	Marianon και ReVelle	1994	QPLSCP	Μεγιστοποιεί την ολική κάλυψη της ζήτησης με πιθανότητα τουλάχιστον a
	Marianon και ReVelle	1996	QMALP	Μεγιστοποιεί την ολική κάλυψη της ζήτησης με πιθανότητα τουλάχιστον a
	Church και ReVelle	1998	QMCLP	Μεγιστοποιεί την ολική κάλυψη της ζήτησης με χρόνο στην ουρά αναμονής το πολύ τ με πιθανότητα τουλάχιστον a

3.1. Γενικά

Η παρούσα εργασία ασχολείται με το κομμάτι της μετασεισμικής διαχείρισης ενός σεισμικού γεγονότος που αφορά τον καθορισμό των ζωνών ευθύνης των συνεργείων επιθεώρησης των κτιρίων καθώς και την δρομολόγηση εντός αυτών. Θεωρούμε πως το σεισμικό γεγονός είναι μεγάλης κλίμακας με αποτέλεσμα την εμφάνιση ζημιών στις κτιριακές υποδομές του συνόλου της αστικής περιοχής. Στόχος της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός πρότυπου αλγορίθμου για την οριοθέτηση των βέλτιστων περιοχών ευθύνης των συνεργείων επιθεώρησης των υποδομών αλλά και της βέλτιστης δρομολόγησής τους εντός των ζωνών, ώστε να καταστεί εφικτή η αποτελεσματική και ταχεία καταγραφή και αποτίμηση των βλαβών των κτιριακών υποδομών σε όλο το εύρος του αστικού ιστού με το υπάρχον ανθρώπινο δυναμικό.

Η αντιμετώπιση του περιγραφέντος προβλήματος βασίζεται στα γεωμετρικά και πολεοδομικά δεδομένα του αστικού ιστού, δηλαδή στο μέγεθος των οικοδομικών τετραγώνων που συνθέτουν τον αστικό ιστό καθώς και τη δόμηση σε καθένα από αυτά. Τα δεδομένα αυτά καθορίζουν - ποσοτικοποιούν το εύρος του απαιτούμενου έργου για την ολοκλήρωση της επιθεώρησης του αστικού ιστού. Η μεθοδολογία για την αντιμετώπιση του προβλήματος παρουσιάζεται αναλυτικά στη συνέχεια του κεφαλαίου.

3.2. Ο Αστικός Ιστός

Κάθε αστικός ιστός αναπτύσσεται ακολουθώντας κάποιο ρυμοτομικό σχέδιο. Το ρυμοτομικό σχέδιο (αλλιώς και σχέδιο πόλεως) σύμφωνα με το άρθρο 2 του Ν.1577/1985 [αναφορά] είναι το διάγραμμα, με τυχόν ειδικό κανονισμό, που καθορίζει τους ειδικούς όρους δόμησης, τους κοινόχρηστους χώρους και τις επιτρεπόμενες χρήσεις σε κάθε τμήμα ή ζώνη οικισμού. Κατά το ρυμοτομικό σχέδιο υπάρχουν οι δρόμοι οι οποίοι διασταυρώνονται και περικλείουν τα οικοδομικά

τετράγωνα. Το σύνολο των οικοδομικών τετραγώνων και των οδών που τα περικλείουν συνιστούν το ρυμοτομικό σχέδιο της πόλης.

Οι κατασκευές αναπτύσσονται εντός των οικοδομικών τετραγώνων. Το είδος και ο χαρακτήρας των κατασκευών αυτών καθορίζεται από τη χρήση γης την οποία επιτρέπει το σχέδιο πόλης. Τα οικοδομικά τετράγωνα ορίζουν συνήθως κοινές ιδιότητες στις υποδομές τις οποίες περιλαμβάνουν. Έτσι, σε κάθε οικοδομικό τετράγωνο ορίζονται κοινές χρήσεις γης και όροι δόμησης. Το γεγονός αυτό ορίζεται και από τον Γενικό Οικοδομικό Κανονισμό (Γ.Ο.Κ.) σύμφωνα με τον οποίο καθιερώνεται το οικοδομικό τετράγωνο ως η ελάχιστη πολεοδομική ενότητα για την ενιαία αισθητική διαμόρφωση του χώρου.

Οι όροι δόμησης είναι οι κανόνες εκείνοι που θέτουν τα όρια, εντός των οποίων νομιμοποιείται να γίνει, η χωροθέτηση και κατασκευή ενός οικοδομήματος εντός του «γηπέδου» στο οικοδομικό τετράγωνο. Κύρια παράμετρος των όρων δόμησης, και κατά συνέπεια παράμετρος που απασχολεί σημαντικά και την κατάστρωση του προτύπου της παρούσας εργασίας, αποτελεί ο συντελεστής δόμησης.

Ο συντελεστής δόμησης (σ.δ) καθορίζει τη μέγιστη δυνατή δομήσιμη επιφάνεια (Δ.Ε) που επιτρέπεται να κατασκευαστεί εντός ενός οικοπέδου, άρα και εντός οικοδομικού τετραγώνου. Η μέγιστη δομήσιμη επιφάνεια προκύπτει πολλαπλασιάζοντας το σ.δ με το εμβαδό (Ε) του οικοδομικού τετραγώνου.

$$\Delta.E = (\sigma.\delta) \cdot E \quad (3.1)$$

Είναι προφανές πως όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής δόμησης σε ένα οικοδομικό τετράγωνο τόσο μεγαλύτερη είναι και η δυνατή δόμηση. Όσο μεγαλύτερη είναι η δυνατή δόμηση, τόσο μεγαλύτερη είναι και η πραγματοποιούμενη κατά κανόνα. Επομένως είναι λογικό σε οικοδομικά τετράγωνα με υψηλούς σ.δ να αναμένεται υψηλή συσσώρευση πληθυσμού. Είναι προφανές λοιπόν πως η δομήσιμη επιφάνεια καθορίζει το μέγεθος της απαιτούμενης συνολικής εργασίας και της έλξης που ασκεί ένα οικοδομικό τετράγωνο σε ένα συνεργείο επιθεώρησης.

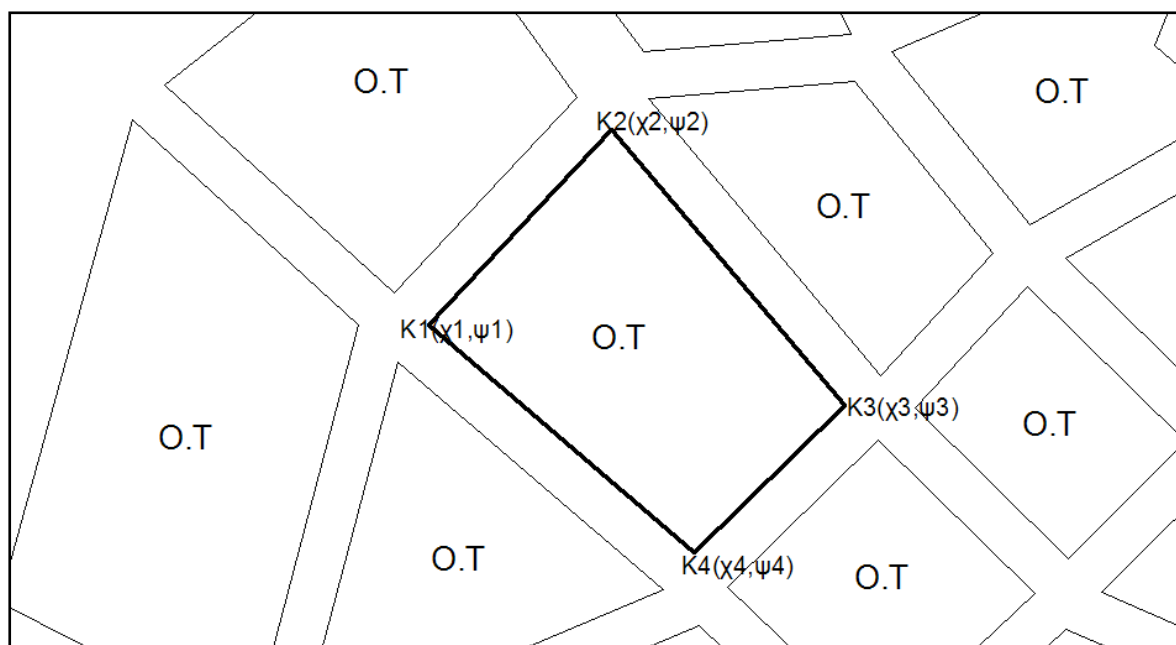
3.3. Η Γεωμετρική Κατάστρωση του Προβλήματος

Εντός του αστικού ιστού, συνηθίζεται τα γειτονικά οικοδομικά τετράγωνα να έχουν ίδιο συντελεστή δόμησης. Θα μπορούσαμε να ομαδοποιήσουμε αυτά τα

οικοδομικά τετράγωνα καταλήγοντας σε λιγότερα, μεγαλύτερα τετράγωνα που χαρακτηρίζονται από κοινό συντελεστή δόμησης. Με τον τρόπο αυτό μειώνουμε σημαντικά το σύνολο των υπό εξέταση κόμβων χωρίς να μειώνουμε την ποιότητα των αποτελεσμάτων.

3.3.1 Τα οικοδομικά τετράγωνα - Εμβαδομέτρηση - Κέντρο Βάρους

Το κάθε οικοδομικό τετράγωνο ορίζεται ως ο χώρος που περικλείεται από ένα σύνολο ρυμοτομικών γραμμών που τέμνονται. Έτσι ένα οικοδομικό τετράγωνο θεωρείται πολύγωνο με πλευρές τις ρυμοτομικές γραμμές. Τα σημεία τομής των ρυμοτομικών γραμμών που ορίζουν το οικοδομικό τετράγωνο αποτελούν τις κορυφές του πολυγώνου αυτού.



Σχήμα 3-1: Γεωμετρικός ορισμός οικοδομικού τετραγώνου.

Έστω οικοδομικό τετράγωνο με κορυφές τις K_0, K_1, \dots, K_{v-1} και συνεταγμένες των κορυφών αυτών $(\chi_0, \psi_0), (\chi_2, \psi_2), \dots, (\chi_{v-1}, \psi_{v-1})$ αντίστοιχα με $K_v = K_0$. Από τις συνεταγμένες του οικοδομικού τετραγώνου και με βάση την Ευκλείδεια Γεωμετρία το εμβαδό του οικοδομικού τετραγώνου με βάση τη σχέση:

$$\text{Εμβαδό}(K_0, K_1, \dots, K_{v-1}) = \frac{\sum_{i=0}^{v-1} (\chi_i * \psi_{i+1} - \psi_i * \chi_{i+1})}{2} \quad (3.2)$$

όπου

(χ_i, ψ_i) οι συντεταγμένες του σημείου K_i

$K_v \equiv K_0$

Από τις συντεταγμένες του οικοδομικού τετραγώνου (Ο.Τ) μπορούν επίσης να υπολογιστούν και οι συντεταγμένες $\chi_{K.B.}$ και $\psi_{K.B.}$ του κέντρου βάρους αυτού (Κ.Β). Έτσι αν K_0, K_1, \dots, K_{v-1} οι κορυφές του με $(\chi_0, \psi_0), (\chi_1, \psi_1), \dots, (\chi_{v-1}, \psi_{v-1})$ αντίστοιχες συντεταγμένες και $K_v = K_0$ τότε προκύπτουν οι συντεταγμένες του (Κ.Β) αυτού σαν οι μέσοι όροι των συντεταγμένων των κορυφών αυτού :

$$\chi_{K.B} = \frac{\chi_1 + \chi_2 + \dots + \chi_v}{v}, \quad \psi_{K.B} = \frac{\psi_1 + \psi_2 + \dots + \psi_v}{v} \quad (3.3)$$

3.3.2. Η Ζήτηση για Επιθεώρηση

Στην παρούσα εργασία θα ορίσουμε την ζήτηση κάθε οικοδομικού τετραγώνου ως ποσοτικό ανάλογο του απαιτούμενου χρόνου για την επιθεώρηση αυτού. Για τον υπολογισμό της ζήτησης θα χρησιμοποιήσουμε τα γεωμετρικά δεδομένα. Για το λόγο αυτό ορίζονται οι εξής παραδοχές:

- Ως ζήτηση (Z) για επιθεώρηση του οικοδομικού τετραγώνου ορίζεται η μέγιστη πραγματοποιούμενη δόμηση. Αυτή υπολογίζεται από το γινόμενο του εμβαδού του οικοδομικού τετραγώνου που προκύπτει από τη σχέση (3.2) με το συντελεστή δόμησης που ισχύει για το παρόν τετράγωνο.

$$Z_{(O.T)} = \text{Εμβαδό}(K_0, K_1, \dots, K_{v-1}) * (\sigma \cdot \delta) \quad (3.4)$$

- Η ζήτηση (Z) θεωρείται πως βρίσκεται συγκεντρωμένη στο κεντροειδές του οικοδομικού τετραγώνου (κέντρο βάρους).

$$Z_{(O.T)}(\chi, \psi) \equiv Z(\chi_{K.B}, \psi_{K.B}) \quad (3.5)$$

3.4. Επίλυση με γενετικούς αλγόριθμους

3.4.1. Γιατί γενετικοί αλγόριθμοι;

Οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν γενική μεθοδολογία βελτιστοποίησης, η οποία παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα ειδικά σε συνδυαστικά προβλήματα πολλών αγνώστων και παραμέτρων. Τέτοια πλεονεκτήματα είναι για παράδειγμα το γεγονός ότι δεν εγκλωβίζονται σε τοπικά ακρότατα και εξετάζουν ευρύ πεδίο λύσεων. Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται συχνά για την βελτιστοποίηση συνδυαστικών προτύπων (combinatorial models). Τα πρότυπα αυτά παρουσιάζουν το χαρακτηριστικό του πεπερασμένου αριθμού δυνατών λύσεων, που αποτελούν συνδυασμό των δυνατών τιμών των ανεξάρτητων μεταβλητών (Winston, 1994). Σύμφωνα με τους Gen και Cheng (1999), οι γενετικοί αλγόριθμοι παρουσιάζουν ικανοποιητική απόδοση στην επίλυση συνδυαστικών προβλημάτων αφού δεν εγκλωβίζονται σε τοπικά ακρότατα. Επιπλέον, παρέχουν τη δυνατότητα άμεσου χειρισμού διακριτών μεταβλητών, γεγονός που διευκολύνει στην απεικόνιση συνδυαστικών προβλημάτων (Gen και Cheng, 1999). Το πρότυπο P-median είναι συνδυαστικό, αφού πρέπει να βρεθεί ο συνδυασμός των τιμών των μεταβλητών X και Y του προτύπου ώστε να ελαχιστοποιηθεί η αντικειμενική συνάρτηση. Όπως φαίνεται και στην βιβλιογραφία, στο παρελθόν έχει προταθεί η χρήση διαφορετικών γενετικών αλγορίθμων για την επίλυση του προτύπου P-median. Αντίστοιχος γενετικός αλγόριθμος εφαρμόζεται και στην παρούσα διπλωματική εργασία. Όσον αφορά τις δρομολογήσεις, αυτές θα επιλυθούν με χρήση του Ant Colony Optimization δομημένο πάνω στο Traveling Salesman Problem.

3.4.2 Ο Αλγόριθμος Harmony Search Minimization.

Για βελτιστοποίηση χρησιμοποιούνται παραδοσιακά, αλγόριθμοι βασισμένοι στον απειροστικό λογισμό. Οι αλγόριθμοι αυτοί χρησιμοποιούν πληροφορίες της κλίσης, της προς βελτιστοποίηση συνάρτησης, ώστε να βρουν τη σωστή διεύθυνση προς τη βέλτιστη λύση. Όμως αν οι μεταβλητές είναι διακριτές αντί για συνεχείς δεν έχουν παραγώγους. Για να αντιπαρέλθει αυτήν την κατάσταση ο αλγόριθμος Έρευνας Αρμονίας (Harmony Search), στον οποίο στη συνέχεια θα αναφερόμαστε σαν HS, χρησιμοποιεί μία στοχαστική παράγωγο, η οποία αξιοποιεί τις εμπειρίες

των μουσικών μιας τζαζ ορχήστρας κατά τη διάρκεια ενός αυτοσχεδιασμού. Ακριβώς σε αυτή του την καταγωγή οφείλει και το όνομά του[αναφορά].

Αντί πληροφοριών της κλίσης μιας αντικειμενικής συνάρτησης, η στοχαστική παράγωγος του HS, δίνει μια πιθανότητα επιλογής για κάθε τιμή της μεταβλητής απόφασης. Για παράδειγμα, εάν η μεταβλητή απόφασης x_1 έχει τρεις δυνατές τιμές $\{1, 2, 3\}$, η μερική στοχαστική παράγωγος της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς τη x_1 σε κάθε διακριτή τιμή, δίνει την πιθανότητα επιλογής για κάθε τιμή, για παράδειγμα 20% για 1, 30% για 2, και 50% για 3. Ενώ η αθροιστική πιθανότητα γίνεται μονάδα (100%), η πιθανότητα για κάθε τιμή της ανανεώνεται σε κάθε νέα επανάληψη. Το επιθυμητό είναι, η τιμή η οποία περιλαμβάνεται στο βέλτιστο διάνυσμα λύσης, να έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να επιλεγεί με την αύξηση των επαναλήψεων.

3.4.2.1 Διατύπωση του Προβλήματος στον HS.

Ο αλγόριθμος HS επινοήθηκε για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Έτσι, προκειμένου να εφαρμοσθεί ο αλγόριθμος HS, το προς επίλυση πρόβλημα θα πρέπει να διατυπωθεί στη μορφή βελτιστοποίησης μίας αντικειμενική συνάρτησης που υπόκειται σε περιορισμούς[αναφορά]:

$$\text{Βελτιστοποίησε (ελαχιστοποίησε ή μεγιστοποίησε) την } f(x) \quad (1)$$

που υπόκειται στους περιορισμούς:

$$h_i(x) = 0; \quad i = 1, \dots, p; \quad (2)$$

$$g_i(x) \geq 0; \quad i = 1, \dots, q; \quad (3)$$

$$x_i \in X_i = \{x_i(1), \dots, x_i(k), \dots, x_i(K_i)\} \quad \text{or} \quad x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad (4)$$

Ο αλγόριθμος HS ψάχνει ολόκληρες περιοχές λύσεων, ώστε να βρει το διάνυσμα βέλτιστης λύσης

$x = (x_1, \dots, x_n)$, το οποίο βελτιστοποιεί (ελαχιστοποιεί ή μεγιστοποιεί) την αντικειμενική συνάρτηση $f(x)$ όπως στην (1). Αν το πρόβλημα έχει ισοτικούς ή ανισοτικούς περιορισμούς αυτοί περιγράφονται σαν σύνδεσμοι όπως στις (2) και (3) αντίστοιχα. Αν η μεταβλητή απόφασης έχει διακριτές τιμές το σύνολο των αποδεκτών τιμών γίνεται

$$x_k \in X_k = \{x_k(1), \dots, x_k(n), \dots, x_k(K_k)\}$$

και αν η μεταβλητή απόφασης έχει συνεχείς τιμές το σύνολο των αποδεκτών τιμών γίνεται

$$x_k^L \leq x_k \leq x_k^U.$$

Ο αλγόριθμος HS χρησιμοποιεί μόνο την αντικειμενική συνάρτηση. Αν όμως το διάνυσμα λύσης παραβιάζει κάποιο σύνδεσμο, τότε είτε απορρίπτεται το διάνυσμα, είτε προσθέτει κάποια ποινή στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

3.4.2.2 Παράμετροι του HS Αλγορίθμου.

Όταν έχει ολοκληρωθεί η μοντελοποίηση του προς επίλυση προβλήματος, πρέπει να δώσουμε τιμές στις παραμέτρους της HS οι οποίες τιμές πρέπει να βρίσκονται εντός συγκεκριμένων ορίων. Οι παράμετροι αυτές είναι οι HMS, HMCR, PAR, MI, FW[αναφορά].

HMS: Είναι το μέγεθος της μνήμης του αλγορίθμου. Δηλαδή ορίζει τον αριθμό των διανυσμάτων - λύσεων που κρατά - αξιοποιεί ο αλγόριθμος

HMCR: Είναι η πιθανότητα ($0 \leq HMCR \leq 1$) ο αλγόριθμος να επιλέξει μια τυχαία λύση από τη μνήμη του. Άρα για πιθανότητα $1 - HMCR$ ο αλγόριθμος θα διαλέξει μια νέα τυχαία λύση, μη αποθηκευμένη στη μνήμη.

PAR: Είναι η πιθανότητα ($0 \leq PAR \leq 1$) για την οποία ο αλγόριθμος βελτιστοποιεί μια από τις αποθηκευμένες στη μνήμη λύσεις. Άρα για πιθανότητα $1 - PAR$ ο αλγόριθμος επιλέγει μία λύση από τις αποθηκευμένες στη μνήμη και την βελτιστοποιεί.

MI: Είναι ο αριθμός επαναλήψεων που θα κάνει ο αλγόριθμος.

FW: Είναι ένα τυχαίο (αυθαίρετα επιλεγμένο μήκος) που χρησιμοποιείται για συνεχείς μεταβλητές.

Από πολλούς ερευνητές έχει προταθεί αντί για τυχαίες τιμές παραμέτρων να ορίζονται τιμές γραμμικά μεταβαλλόμενες σε κάθε επανάληψη [4]όπως για παράδειγμα με τις σχέσεις:

$$PAR(I) = PAR_{\min} + (PAR_{\max} - PAR_{\min}) * \frac{1}{MI} \quad (5)$$

$$FW(I) = FW_{\max} \exp \left[\ln \left(\frac{FW_{\min}}{FW_{\max}} \right) \frac{1}{MI} \right] \quad (6)$$

Στη βιβλιογραφία [αναφορά] αναφέρονται και τυποποιημένοι συνδυασμοί παραμέτρων που έχουν προκύψει από επαναλήψεις επιλύσεων. Επίσης υπάρχουν και προτάσεις για την ενσωμάτωση της επιλογής παραμέτρων ώστε να βελτιστοποιείται μέσω του αλγορίθμου και η επιλογή των τιμών τους[αναφορά]

3.4.2.3 Αρχική Μνήμη.

Πριν ο αλγόριθμος να μπει στο τμήμα της βελτιστοποίησης, πρέπει να δημιουργήσουμε την αρχική μνήμη. Όπως οι μουσικοί έχουν στη μνήμη τους αποθηκευμένες ακολουθίας από νότες έτσι και ο αλγόριθμος απαιτεί την προϋπαρξη μνήμης, δηλαδή λύσεων. Ο αριθμός των λύσεων αυτών καθορίζεται από το HMS. Αυτή η μνήμη μπορεί στο σύνολό να παρασταθεί από έναν πίνακα της μορφής:

$$\mathbf{HM} = \left[\begin{array}{ccc|c} x_1^1 & \cdots & x_n^1 & f(\mathbf{x}^1) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ x_1^{hms} & \cdots & x_n^{hms} & f(\mathbf{x}^{hms}) \end{array} \right].$$

3.4.2.4 Βελτιστοποίηση.

Οι μουσικοί της Jazz, όταν αυτοσχεδιάζουν, έχοντας ακούσει την τελευταία νότα που παίχτηκε, είτε παίζουν μια τυχαία νότα για να ακούσουν τη μελωδία που θα προκύψει, είτε ανατρέχουν στη μνήμη τους για να επιλέξουν μια νότα που σε συνδυασμό με την προηγούμενη δίνει μια μελωδία που τους αρέσει. Έτσι και ο αλγόριθμος HS, είτε διαλέγει μια νέα τυχαία λύση, είτε τυχαία μία από τις αποθηκευμένες λύσεις, είτε βελτιστοποιεί μία από τις αποθηκευμένες λύσεις[αναφορά].

Πιο συγκεκριμένα, οι τρεις ενέργειες του αλγορίθμου είναι:

A) Τυχαία Επιλογή

Όταν ο αλγόριθμος διαβάζει την τιμή x_i^{New} για μια καινούρια αρμονία(επανάληψη)

$$x^{New} = (x_1^{New}, \dots, x_n^{New}),$$

τότε διαλέγει τυχαία μια τιμή μέσα από το σύνολο

$$\{x_i(1), \dots, x_i(K_i)\} \quad \acute{\eta} \quad x_i^L \leq x_i \leq x_i^{HMS}$$

με πιθανότητα $(1 - HMCR)$.

B) Αξιοποίηση Μνήμης (1)

Όταν ο αλγόριθμος διαβάζει την τιμή x_i^{New} για μια καινούρια επανάληψη, τότε διαλέγει τυχαία μια τιμή x_i^j από την $HM = \{x_i^1, \dots, x_i^{HMS}\}$ με πιθανότητα HMCR. Η τιμή του j μπορεί να υπολογιστεί με κανονική κατανομή $U(0,1)$
 $j \leftarrow \text{int}(U(0,1) * HMS) + 1$
ή και με άλλες κατανομές όπως $[U(0,1)]^2$

Γ) Αξιοποίηση Μνήμης (2)

Αφού έχει επιλεγεί από τη μνήμη η νέα τιμή-λύση x_i^{New} , ο αλγόριθμος επεμβαίνει σε αυτή μεταβάλλοντας την λίγο για να οδηγήσει σε μια νέα καλύτερη λύση. Η πιθανότητα για την επιλογή της περίπτωσης αυτής είναι ίση με PAR. Αν το πρόβλημα έχει διακριτές μεταβλητές, η επιλεγμένη τιμή $x_i(k) = x_i^{New}$ θα γίνει $x_i(k+m)$ όπου $m \in \{-1, 1\}$. Αν το πρόβλημα έχει μη διακριτές μεταβλητές, η επιλεγμένη τιμή $x_i(k) = x_i^{New}$ θα γίνει $x_i^{New} + \Delta$ όπου $\Delta = U(0,1) * FW(i)$

Οι παραπάνω τρεις βασικές λειτουργίες μπορούν να παρασταθούν ως εξής:

$$x_i^{New} \leftarrow \begin{cases} \begin{cases} x_i \in \{x_i(1), \dots, x_i(k), \dots, x_i(K_i)\} \\ x_i \in [x_i^{Lower}, x_i^{Upper}] \end{cases} & \text{με πιθανότητα } (1 - HMCR) \\ \begin{cases} x_i \in HM = \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{HMS}\} \\ x_i(k+m) \text{ αν } x_i(k) \in HM \\ x_i + \Delta \text{ αν } x_i \in HM \end{cases} & \begin{cases} \text{με πιθανότητα } HMCR * (1 - PAR) \\ \text{με πιθανότητα } HMCR * PAR \end{cases} \end{cases}$$

3.4.2.5 Έλεγχος Νέας Λύσης.

Με τη λήξη κάθε μιας από τις τρεις περιπτώσεις, προκύπτει ένα νέο διάνυσμα - λύση x^{New} . Ο αλγόριθμος ελέγχει αν η νέα λύση ικανοποιεί τους περιορισμούς του προβλήματος. Αν δεν τους ικανοποιεί τότε είτε την εγκαταλείπει είτε προσθέτει κάποια ποινή στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Αν ικανοποιεί τους περιορισμούς τότε ο αλγόριθμος αρχίζει τη σύγκρισή της με τις λύσεις που είναι αποθηκευμένες στη μνήμη του. Η σύγκριση αυτή γίνεται με βάση την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της κάθε λύσης. Αν η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι καλύτερη (μικρότερη) από αυτήν της χειρότερης αποθηκευμένης λύσης, τότε η νέα λύση παίρνει τη θέση της. Αλλιώς η νέα λύση εγκαταλείπεται [αναφορά].

3.4.2.6 Τερματισμός Αλγορίθμου.

Η εκτέλεση του αλγορίθμου συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθούν τα κριτήρια τερματισμού του. Αυτά είναι είτε ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων είτε η πολύ μικρή μείωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για μεγάλο αριθμό συνεχόμενων επαναλήψεων είτε κάποιο χρονικό όριο εκτέλεσης.

3.4.3 Ο Αλγόριθμος Ant Colony Optimization (ACO).

Ο αλγόριθμος Ant Colony Optimization (ACO) είναι μία, βασισμένη σε πληθυσμό, πιθανοτική τεχνική για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης όπως κυρίως η εύρεση βέλτιστων διαδρομών εντός γραφημάτων. Είναι εμπνευσμένος από την συμπεριφορά των μυρμηγκιών στο φυσικό περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, τα άτομα μιας αποικίας μυρμηγκιών έχουν την τάση να περπατάνε σε τυχαίες κατευθύνσεις εκτός της φωλιάς τους για την αναζήτηση τροφής. Μόλις εντοπίσουν τροφή, επιστρέφουν στην αποικία τους αφήνοντας ίχνη φερομόνης κατά μήκος της διαδρομής. Τα άλλα μέλη της αποικίας, εντοπίζουν δια της οσμής τη φερομόνη, η ύπαρξη της οποίας τα ωθεί να ακολουθήσουν το ίχνος αυτό και να εναποθέσουν κι αυτά με τη σειρά τους φερομόνη στο μονοπάτι. Όσο πιο έντονη είναι η οσμή της φερομόνης, τόσο πιο ελκυστική είναι η διαδρομή για τα μέλη της αποικίας. Έτσι, η τυχαία περιπλάνησή τους για εύρεση τροφής μετατρέπεται σε συγκεκριμένο μονοπάτι από την αποικία μέχρι την τροφή που βρέθηκε από κάποιο μέλος[αναφορά].

Με την πάροδο του χρόνου, η ποσότητα φερομόνης που υπάρχει στο μονοπάτι μειώνεται λόγω εξάτμισης. Συνεπώς, σε μεγάλες διαδρομές όπου ο χρόνος μετακίνησης, από την αποικία μέχρι την τροφή και επιστροφή, είναι μεγάλος, η φερομόνη εξατμίζεται για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αντίθετα, ένα μικρότερο μονοπάτι χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη συγκέντρωση φερομόνης λόγω μικρότερου χρόνου εξάτμισης. Αν η φερομόνη δεν εξατμιζόταν, όλα τα μονοπάτια θα ήταν το ίδιο προτιμητέα από τον πληθυσμό. Λόγω όμως της μειωμένης εξάτμισης στα συντομότερα μονοπάτια απ' ό,τι στα μακρύτερα, ο πληθυσμός τείνει να ακολουθήσει αυτά. Τελικά, τα μέλη της αποικίας θα ακολουθούν το ένα το άλλο πάνω στο συντομότερο μονοπάτι.

Από την παρατήρηση της συμπεριφοράς αυτής, προέκυψε η ιδέα της εξομοίωσής της για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής σε μια γραφική απεικόνιση ενός προβλήματος. Με τον καιρό ο αλγόριθμος έχει βρει μεγάλο πεδίο εφαρμογής στα προβλήματα βελτιστοποίησης όπως για παράδειγμα στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών[αναφορά].

Στη σύγχρονη μορφή του, ο αλγόριθμος ACO χρησιμοποιεί τεχνητά μυρμήγκια τα οποία ψάχνουν για “καλές” λύσεις εντός ενός σταθμισμένου γραφήματος. Το μοντέλο εναπόθεσης και εξάτμισης της φερομόνης κατασκευάζεται από τις παραμέτρους που θέλουμε να ορίζουν τόσο το πρόβλημα όσο και τη λύση του.

Η χρήση του ACO εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε δύσκολα συνδυαστικά προβλήματα με πολλές ή και μεταβλητές παραμέτρους.

3.4.3.1 Εφαρμογή του ACO στο Traveling Salesman Problem

Καταστρώνουμε ένα γράφημα στο οποίο κάθε κόμβος αντιστοιχεί σε μια πόλη. Ο κόμβος τοποθετείται στο κέντρο βάρους της πόλης όπως αυτό ορίζεται. Φροντίζουμε να ενώσουμε κάθε πόλη με όλες τις υπόλοιπες για να δημιουργήσουμε κάθε πιθανή διαδρομή. Τα μήκη των διαδρομών προκύπτουν από τις ευκλείδειες συντεταγμένες του κέντρου βάρους κάθε πόλης. Οι ποσότητες φερομόνης ξεκινούν από μια αρχική τιμή και είτε αυξάνονται (εναπόθεση) είτε μειώνονται (εξάτμιση) ανά επανάληψη όπως και στο φυσικό μοντέλο. Οι ευρεστικές τιμές, καθορίζονται από το πρόβλημα και στην περίπτωση του (TSP) είναι το αντίστροφο της απόστασης μεταξύ δύο κόμβων για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς[αναφορά].

Σε κάθε επανάληψη, καθένα μυρμήγκι ξεκινά από τυχαίο κόμβο και μετακινείται εντός του γραφήματος κρατώντας στη μνήμη του τους κόμβους που έχει επισκεφθεί και τη σειρά με την οποία τους επισκέφθηκε. Η επιλογή του επόμενου προς επίσκεψη κόμβου γίνεται πιθανοτικά ανάμεσα από αυτούς που δεν έχουν ακόμα επισκεφθεί. Κριτήρια της επιλογής αυτής είναι οι υπάρχουσες ποσότητες φερομόνης και οι ευρεστικές πληροφορίες. Όταν έχουν επισκεφθεί όλοι οι κόμβοι από το μυρμήγκι, έχουμε καταστρώσει μια λύση. Όταν ολοκληρωθεί ο πληθυσμός έχει ολοκληρώσει τις διαδρομές του, τότε αρχικά μειώνουμε τις αρχικές τιμές φερομόνης κάθε ένωσης κόμβων κατά ένα συγκεκριμένο ποσοστό και μετά τις αυξάνουμε κατά μια τιμή που καθορίζεται από την “ποιότητα” της λύσης στην οποία ανήκει.

3.4.3.2 Μαθηματική Μοντελοποίηση του Αλγορίθμου

Αρχικά θεωρούμε το πλήθος m των μελών της αποικίας και καθένα από αυτά τοποθετείται σε τυχαία επιλεγμένους m κόμβους. Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου, κάθε μυρμηγκί φτιάχνει μια διαδρομή επισκεπτόμενο κάθε κόμβο διαδοχικά. Εντός μιας επανάληψης υπάρχουν διαδοχικά στάδια απόφασης στα οποία κάθε μυρμηγκί (k) που βρίσκεται σε κάποιον κόμβο (i), αποφασίζει ποιός θα είναι ο επόμενος προς επίσκεψη κόμβος. Η απόφαση αυτή λαμβάνεται με βάση έναν πιθανοτικό κανόνα που ονομάζεται αναλογικά τυχαίος κανόνας. Στην διαδικασία απόφασης χρησιμοποιείται και η μνήμη M_k του k μυρμηγκιού που περιέχει τους κόμβους που έχει ήδη επισκεφθεί με τη σειρά επίσκεψης. Από τη μνήμη αυτή δημιουργείται το σύνολο N_{ki} των κόμβων που δεν έχει επισκεφθεί το k . Άρα η πιθανότητα να μεταβεί το μυρμηγκί k από τον κόμβο i , στον οποίο βρίσκεται, στον κόμβο j είναι:

$$P_{i,j}^k = \frac{(\tau_{i,j})^a * (n_{i,j})^\beta}{\sum_{l \in N_{ki}} ((\tau_{i,l})^a * (n_{i,l})^\beta)}, \text{ if } j \in N_{ki}^k \quad (1)$$

όπου $\tau_{i,j}$ είναι η ποσότητα φερομόνης στην ένωση των κόμβων i και j , a είναι η παράμετρος που ορίζει την επίδραση του $\tau_{i,j}$, β είναι η παράμετρος που ορίζει την επίδραση του $n_{i,j}$, με το $n_{i,j}$ να είναι οι ευρεστικές πληροφορίες που καθορίζουν την πρόκληση επιθυμίας μετακίνησης ανάμεσα στους κόμβους i,j .

$$n_{i,j} = \frac{1}{d_{i,j}} \quad (2)$$

Σύμφωνα με την (2), η επιθυμία μετακίνησης από τον κόμβο i στον κόμβο j είναι αντιστρόφως ανάλογη της μεταξύ τους απόστασης. Εξ ορισμού αποκλείουμε την περίπτωση επιλογής κόμβου εκτός του συνόλου N_{ki} ενώ η πιθανότητα επιλογής συγκεκριμένης μετακίνησης εξαρτάται από την τιμή της φερομόνης που υπάρχει στη διαδρομή της μετακίνησης αυτής.

Εξίσου σημαντικές είναι και οι τιμές των παραμέτρων a, β . Αν για παράδειγμα το $a=0$ τότε θα επιλέγεται κάθε φορά ο κοντινότερος κόμβος ενώ αν $\beta=0$ τότε έχουμε συνεχώς αυξανόμενη τιμή φερομόνης.

Αφού όλα τα m μυρμήγκια έχουν κατασκευάσει τις διαδρομές τους, ανανεώνουμε τις υπάρχουσες ποσότητες φερομόνης πριν την έναρξη της επόμενης επανάληψης ($t+1$) με βάση τον εξής κανόνα:

$$\tau_{i,j}(t+1) = (1 - \rho) * \tau_{i,j}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{i,j}^k(t), \forall (i, j) \in A \quad (3)$$

όπου ρ είναι ο ρυθμός εξάτμισης της φερομόνης, A είναι το σύνολο των ενώσεων (διαδρομών) μεταξύ των κόμβων και $\Delta\tau_{i,j}^k(t)$ είναι η ποσότητα της φερομόνης που το k μυρμήγκι αφήνει στη διαδρομή που διέσχισε κατά την συνολική μετακίνησή του.

Το $\Delta\tau_{i,j}^k(t)$ δίνεται από την:

$$\Delta\tau_{i,j}^k = \begin{cases} \frac{1}{L(T_k)} & \text{if connection } (i, j) \text{ belongs to } T^k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

Το ρ πρέπει να παίρνει τιμές <1 ώστε να αποφευχθεί η συσσώρευση φερομόνης στο μονοπάτι. Σε γενικές γραμμές, τα μονοπάτια που διασχίζονται από περισσότερα μυρμήγκια και ανήκουν σε συντομότερες συνολικές διαδρομές θα έχουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις φερομόνης και συνεπώς περισσότερες πιθανότητες να επιλεγούν από μυρμήγκια σε επόμενες επαναλήψεις[αναφορά].

4.1. Γενικά

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε μία θεωρητική παρουσίαση του προτύπου που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία. Η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του μαθηματικού προτύπου απαιτεί την εφαρμογή του με χρήση πραγματικών στοιχείων. Για το λόγο αυτό γίνεται χρήση δεδομένων από την πόλη της Πάτρας.

Από την πόλη της Πάτρας θα χρειαστεί να κατασκευαστεί μία βάση δεδομένων, η οποία θα αποτελέσει και το εργαλείο εκείνο με το οποίο θα δοκιμαστεί η λειτουργία του προτύπου.

Για την επίλυση του προτύπου με γενετικούς αλγορίθμους θα γραφεί πρόγραμμα σε περιβάλλον Matlab που θα ενσωματώνει τα γεωμετρικά δεδομένα, τον αλγόριθμο HS και τον αλγόριθμο ACO. Τέλος, θα εκτυπώνει σε αρχεία κειμένου τις βέλτιστες περιοχές ευθύνης και δρομολογήσεις και τους βέλτιστους χρόνους για κάθε σενάριο επίλυσης.

Για τον έλεγχο του γεγονότος πως το πρότυπο δίνει αντικειμενικά σωστά αποτελέσματα αλλά και ότι οι γενετικοί αλγόριθμοι λειτουργούν σωστά, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας με πολλές διαδοχικές επιλύσεις με διαφορετικές παραμέτρους για τους δύο γενετικούς αλγόριθμους.

4.2. Το ψηφιακό υπόβαθρο της πόλης της Πάτρας



Σχήμα 4.1: Η Πόλη της Πάτρας.

Για την εφαρμογή του προτύπου πρέπει να ληφθούν κάποια δεδομένα που έχουν να κάνουν με τη γεωμετρία του δικτύου της Πάτρας αλλά και τα πολεοδομικά χαρακτηριστικά του.

Για το λόγο αυτό γίνεται χρήση ενός ψηφιακού μοντέλου του δικτύου της πόλης της Πάτρας. Το μοντέλο αυτό έχει κατασκευαστεί σε περιβάλλον AutoCAD. Σε αυτό περιέχονται οι βασικότεροι οδικοί άξονες της Πάτρας, που χωρίζουν την πόλη

σε σύνολα οικοδομικών τετραγώνων. Για την κατασκευή του εφαρμόστηκε ομαδοποίηση οικοδομικών τετραγώνων με τις εξής προϋποθέσεις:

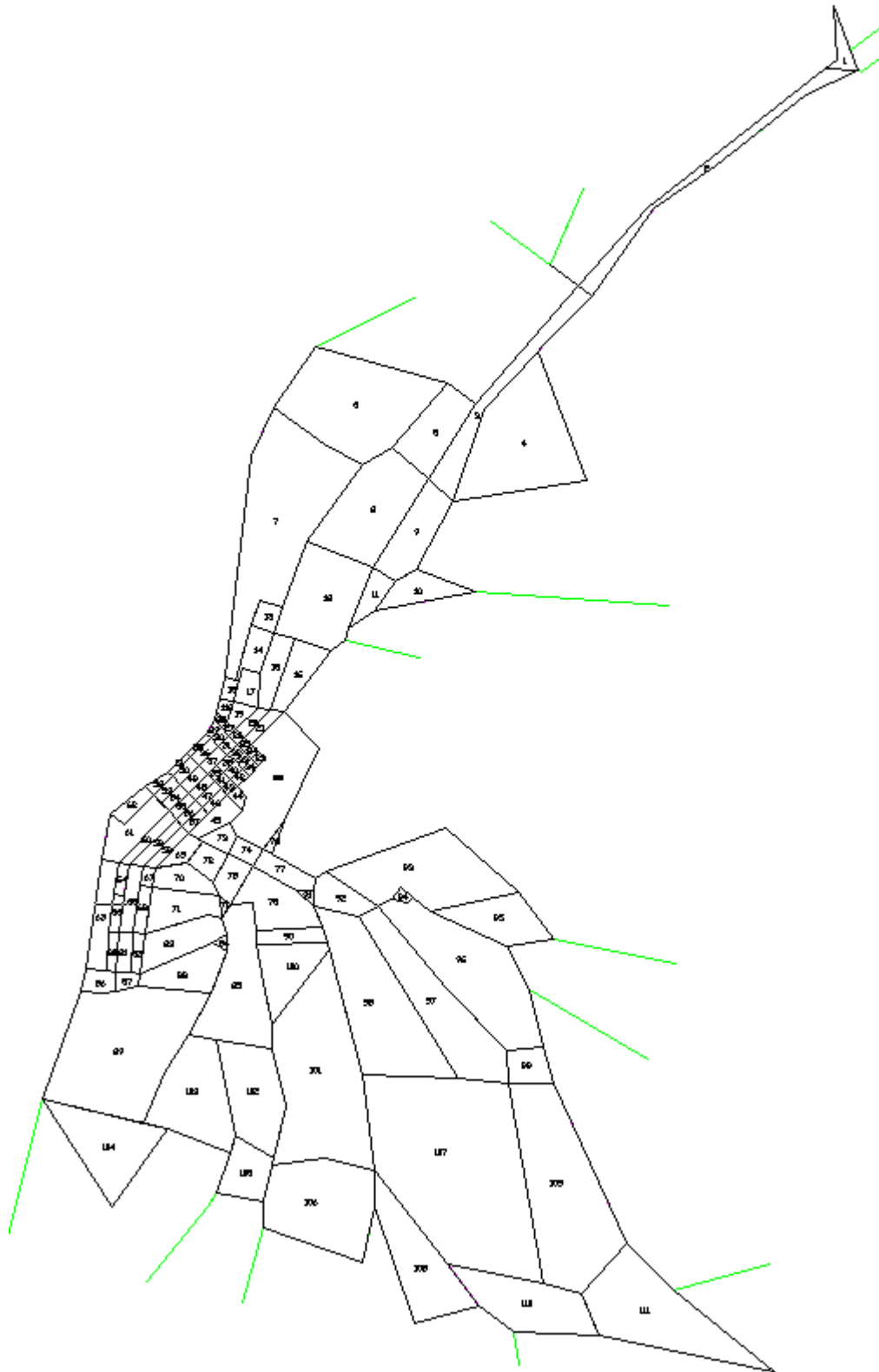
A) τα σύνολα οικοδομικών τετραγώνων να είναι γειτονικά

B) να έχουν κοινές ιδιότητες (π.χ. συντελεστή δόμησης)

Γ) να περικλείονται από βασικές οδούς για την πόλη της Πάτρας.

Η ομαδοποίηση αυτή δεν επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα του προτύπου που έχει κατασκευαστεί, ούτε και την ποιότητα των λύσεων που θα προκύψουν. Επιπλέον, με τον τρόπο αυτό μειώνεται σημαντικά το σύνολο των οικοδομικών τετραγώνων. Αυτό οδηγεί σε σημαντική μείωση του υπολογιστικού φόρτου και χρόνου αφού μειώνονται οι συνολικοί συνδυασμοί πιθανών λύσεων. Αυτό έχει ως συνέπεια μεγαλύτερα περιθώρια για λεπτομερή ανάλυση ευαισθησίας, αφού σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας δεν είναι η ακριβής προσομοίωση του μοντέλου της Πάτρας, αλλά η κατασκευή ενός μαθηματικού προτύπου άρτιου και ικανού να δίνει ακριβή αποτελέσματα σε πραγματικές συνθήκες.

Με τη διαδικασία που περιγράφηκε προκύπτει το ψηφιακό υπόβαθρο της πόλης της Πάτρας. Αυτό αποτελείται από 112 περιοχές, οι οποίες είναι όλες σύνολα πραγματικών οικοδομικών τετραγώνων που γειτνιάζουν όλα μεταξύ τους, έχουν κοινό συντελεστή δόμησης και κατά κανόνα κοινές ιδιότητες. Το ψηφιακό αυτό υπόβαθρο αποτελεί και την αφετηρία της βάσεως δεδομένων της οποίας και γίνεται χρήση για την εφαρμογή του προτύπου.



Σχήμα 4.2: Το ψηφιακό υπόβαθρο της πόλης της Πάτρας σε περιβάλλον AutoCAD.

4.3. Η κατάστρωση της Βάσης Δεδομένων

Έχοντας λοιπόν σχεδιάσει το ψηφιακό υπόβαθρο της πόλης της Πάτρας, με τα σύνολα των οικοδομικών τετραγώνων αριθμημένα και οριοθετημένα, είμαστε σε θέση να αντλήσουμε τα στοιχεία εκείνα που μας χρειάζονται για την κατάστρωση της βάση δεδομένων.

4.3.1. Στοιχεία που προκύπτουν από τα οικοδομικά τετράγωνα

Από το ψηφιακό υπόβαθρο σε περιβάλλον AutoCAD πολύ εύκολα μπορούν να εξαχθούν στοιχεία για το κάθε οικοδομικό τετράγωνο. Τα στοιχεία που μας χρειάζονται είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες των κορυφών των οικοδομικών τετραγώνων. Τα στοιχεία αυτά αποθηκεύονται σε έναν πίνακα διαστάσεων 112×2 . Από τις συντεταγμένες αυτές θα υπολογιστεί το κέντρο βάρους του κάθε οικοδομικού τετραγώνου και θα αποθηκευτεί σε πίνακα 112×1 . Το κέντρο βάρους είναι χρήσιμο από τη στιγμή που γίνεται η θεώρηση πως η ζήτηση για το κάθε οικοδομικό τετράγωνο είναι συγκεντρωμένη στο κέντρο βάρους του. Υπενθυμίζεται πως, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους ενός πολυγώνου προκύπτουν σαν το μέσο όρο των συντεταγμένων των κορυφών του, κατά x και y αντίστοιχα. Έτσι από την (4.2) αν K_0, K_1, \dots, K_{v-1} οι κορυφές του με $(\chi_0, \psi_0), (\chi_1, \psi_1), \dots, (\chi_{v-1}, \psi_{v-1})$ αντίστοιχες συντεταγμένες και $K_v = K_0$ τότε προκύπτουν οι συντεταγμένες του (Κ.Β) αυτού σαν οι μέσοι όροι των συντεταγμένων των κορυφών αυτού :

$$\chi_{K.B} = \frac{\chi_1 + \chi_2 + \dots + \chi_v}{v}, \quad (4.2)$$

$$\psi_{K.B} = \frac{\psi_1 + \psi_2 + \dots + \psi_v}{v}$$

Χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες, υπολογίζεται και το εμβαδό των ομαδοποιημένων οικοδομικών τετραγώνων και αποθηκεύεται σε πίνακα 112×1 . Πολλαπλασιάζοντας το εμβαδό με το συντελεστή δόμησης προκύπτει η μέγιστη πραγματοποιούμενη δόμηση (πίνακας 112×1), η οποία αποτελεί για την περίπτωσή

μας και τη ζήτηση. Έτσι, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, για ένα οικοδομικό τετράγωνο με κορυφές K_0, K_1, \dots, K_{v-1} και συντεταγμένες των κορυφών αυτών $(\chi_0, \psi_0), (\chi_1, \psi_1), \dots, (\chi_{v-1}, \psi_{v-1})$ αντίστοιχα με $K_v = K_0$. Από τις συντεταγμένες του οικοδομικού τετραγώνου και με βάση την Ευκλείδεια Γεωμετρία μπορεί να προκύψει το εμβαδό του οικοδομικού τετραγώνου με βάση τη σχέση:

$$Εμβαδό(K_0, K_1, \dots, K_{v-1}) = \frac{\sum_{i=0}^{v-1} (\chi_i * \psi_{i+1} - \psi_i * \chi_{i+1})}{2} \quad (4.3)$$

όπου (χ_i, ψ_i) οι συντεταγμένες του σημείου K_i

και $K_v = K_0$

Έχοντας τις συντεταγμένες κάθε κέντρου βάρους, θα υπολογιστούν και οι ευκλείδειες αποστάσεις ανάμεσα σε αυτά και θα αποθηκευτούν σε πίνακα 112*112. Είναι και αυτό ένα στοιχείο που χρησιμοποιείται για την επίλυση του προτύπου, αφού υπενθυμίζεται πως το πρότυπο λειτουργεί με βάση τις αποστάσεις μεταξύ των σημείων ζήτησης.

Η εύρεση των πραγματικών συντελεστών δόμησης με βάση τους πολεοδομικούς κανονισμούς για την πόλη της Πάτρας και η αντιστοίχιση τους με τα σύνολα των οικοδομικών τετραγώνων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μπορούσε να γίνει μέσω του αρμοδίου πολεοδομικού γραφείου του δήμου Πατρών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση όμως έγινε μέσω ενός προγράμματος υπολογιστή το οποίο διατίθεται ελεύθερα μέσω διαδικτύου (EuGIS-Σχέδιο Πόλης Πατρών).

4.3.2. Η διαμόρφωση της ζήτησης

Σύμφωνα με την αναφορά που έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι εφικτός ο υπολογισμός της ζήτησης για επιθεώρηση του κάθε οικοδομικού τετραγώνου, οποία όπως έχει προαναφερθεί υπολογίζεται γεωμετρικά. Για το λόγο αυτό γίνονται οι εξής παραδοχές:

- Ως ζήτηση (Z) για επιθεώρηση του ο.τ. ορίζεται η μέγιστη πραγματοποιούμενη δόμηση. Το γινόμενο δηλαδή του εμβαδού του οικοδομικού τετραγώνου που προκύπτει από τη σχέση (4.2)

$$Z_{(o.t)} = Εμβαδό(K_0, K_1, \dots, K_{v-1}) * (\sigma.\delta) \quad (4.4)$$

- Η ζήτηση (Z) θεωρείται πως βρίσκεται συγκεντρωμένη στο κέντρο βάρους του οικοδομικού τετραγώνου.

$$Z_{(O.T)}(\chi, \psi) = (\chi_{K.B}, \psi_{K.B}) \quad (4.5)$$

4.4. Λειτουργία του Αλγορίθμου

Με ολοκληρωμένη πλέον όλη την πιο πάνω διαδικασία, είναι συγκεντρωμένα σε περιβάλλον Excel όλα εκείνα τα στοιχεία που χρειάζονται για την είσοδο στους υπολογισμούς με τη βοήθεια του προτύπου.

Ακολουθεί περιγραφή της λειτουργίας του προγράμματος που συντάχθηκε σε περιβάλλον Matlab στην εργασία αυτή.

4.4.1. Περιγραφή Διαδικασίας Υπολογισμού - Κύριο Πρόγραμμα

Η διαδικασία υπολογισμού που ακολουθείται με βάση το μαθηματικό μοντέλο έχει ως εξής:

Εισάγονται στο πρόγραμμα οι πίνακες του Excel που υπολογίστηκαν προηγουμένως. Επίσης εισάγονται και οι παράμετροι των γενετικών αλγορίθμων HS και ACO. Το πρόγραμμα εκτελεί επαναληπτικές διαδικασίες με τη βοήθεια βρόχου για ομάδες συνεργείων αποτελούμενες από $P =$ δύο ως επτά συνεργεία-μέλη.

Αφού δοθεί τιμή στο $P=P(i)$, γίνεται κλήση στο υποπρόγραμμα που εκτελεί τον αλγόριθμο LH. Μέσα στο υποπρόγραμμα αυτό οριοθετούνται οι περιοχές ευθύνης για καθένα από τα 1 έως P συνεργεία. Ο τρόπος λειτουργίας του υποπρογράμματος αναλύεται παρακάτω. Με την ολοκλήρωση του υποπρογράμματος, επιστρέφεται στο κύριο πρόγραμμα πίνακας X_{best} διαστάσεων $N*1$ (N το σύνολο των κόμβων=112) ο οποίος περιέχει τα ομαδοποιημένα οικοδομικά τετράγωνα που θα επιθεωρήσει κάθε συνεργείο. Για παράδειγμα, αν $X_{best}(8) = 32$ τότε το οικοδομικό τετράγωνο 8 θα επιθεωρηθεί από το συνεργείο που ξεκινά από το οικοδομικό τετράγωνο 32.

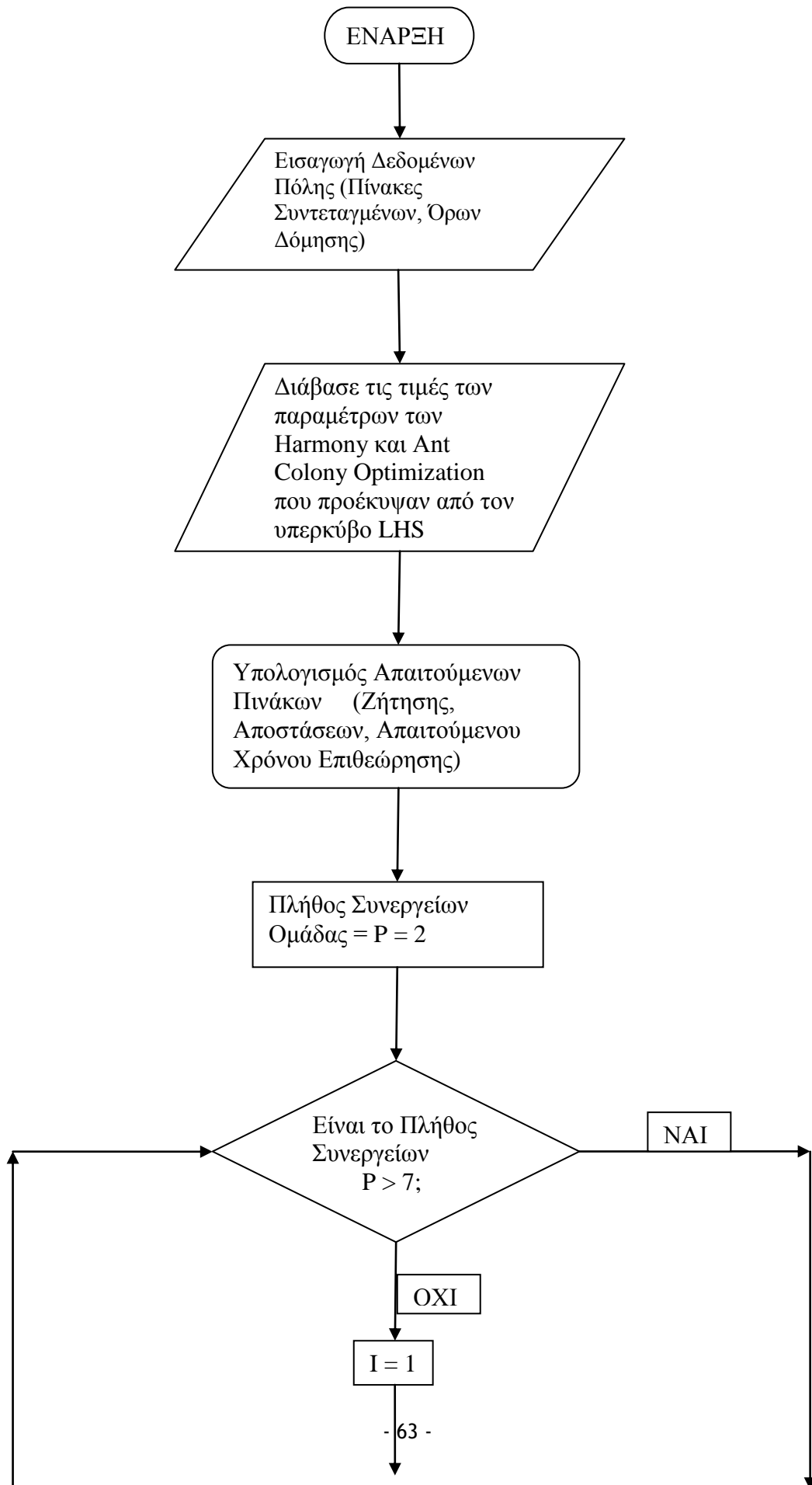
Ακολούθως, ο πίνακας X_{best} διασπάται σε μικρότερους $C(i)$ πίνακες διαστάσεων $M*2$ όπου M είναι το σύνολο των οικοδομικών τετραγώνων που θα επιθεωρήσει το (i) συνεργείο. Στις θέσεις 1 και 2 υπάρχουν οι X και Y

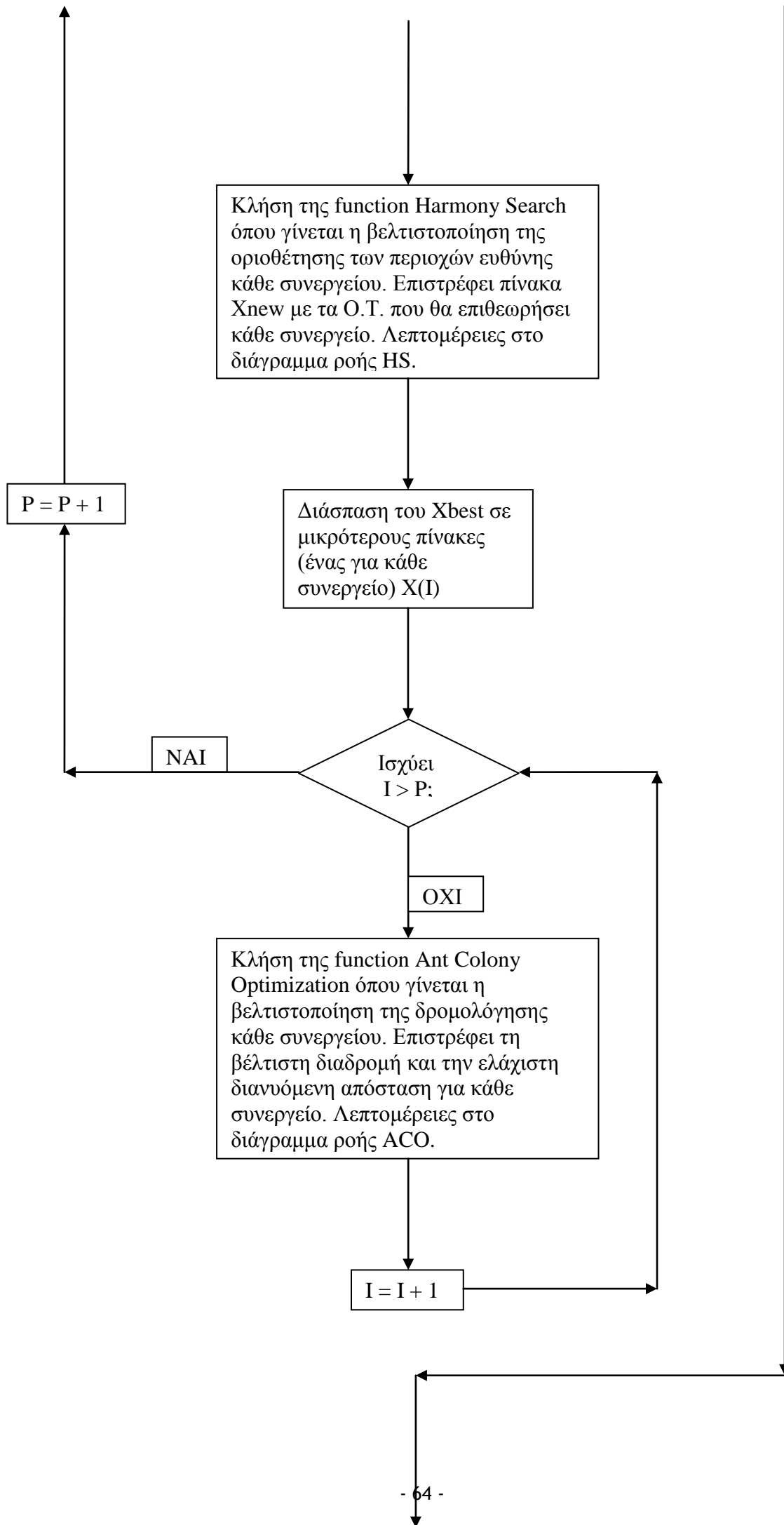
συντεταγμένες των οικοδομικών τετραγώνων που θα επιθεωρήσει το (i) συνεργείο. Στη συνέχεια μέσα σε ένα βρόχο από 1 έως $P(i)$ γίνεται κλήση του υποπρογράμματος που εκτελεί τον αλγόριθμο ACO. Ο τρόπος λειτουργίας του υποπρογράμματος δίνεται παρακάτω. Με την ολοκλήρωση του υποπρογράμματος, επιστρέφεται στο κύριο πρόγραμμα η βέλτιστη διαδρομή κάθε συνεργείου και το μήκος αυτής.

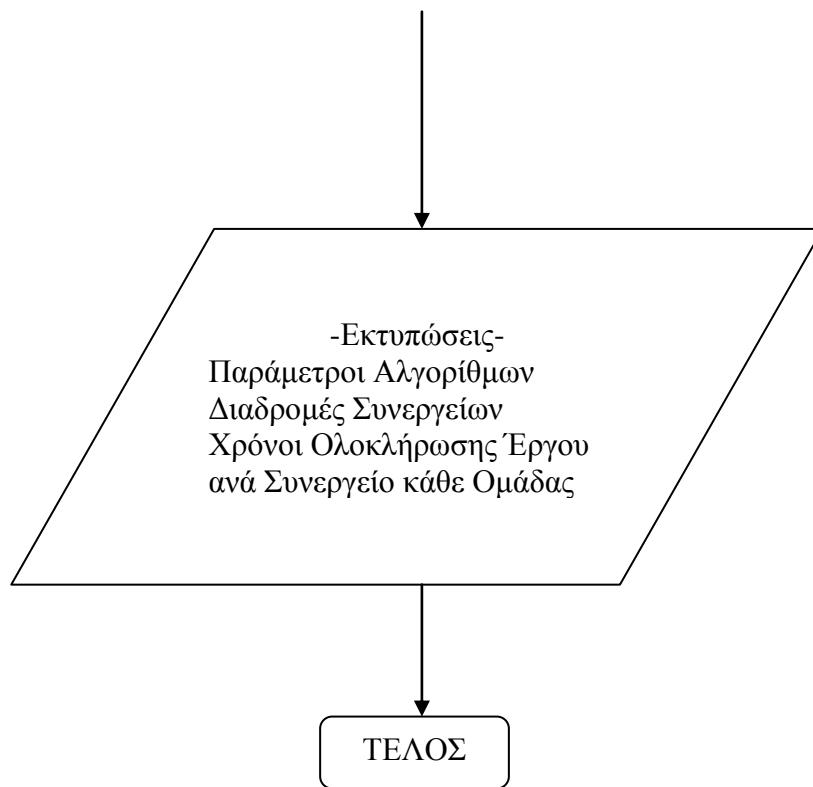
Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι το P να γίνει μεγαλύτερο του 7. Τότε γίνεται η εκτύπωση των αποτελεσμάτων σε txt αρχείο. Παράδειγμα του αρχείου αυτού δίνεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Ακολουθεί το Διάγραμμα Ροής του Κύριου Προγράμματος.

Διάγραμμα Ροής Κύριου Προγράμματος







4.4.2. Περιγραφή Διαδικασίας Υπολογισμού - Function HS

4.4.2.1 Λειτουργία Αλγορίθμου HS.

Προκειμένου να εφαρμοσθεί ο αλγόριθμος HS, το προς επίλυση πρόβλημα θα πρέπει να διατυπωθεί στη μορφή βελτιστοποίησης μίας αντικειμενική συνάρτησης που υπόκειται σε περιορισμούς. Θα χρησιμοποιηθεί μια παραλλαγή της αντικειμενικής συνάρτησης του P-Median ώστε να υπολογίζει τον συνολικό απαιτούμενο χρόνο ανά ομάδα συνεργείων για την ολοκλήρωση της επιθεώρησης.

Βελτιστοποίησε (ελαχιστοποίησε ή μεγιστοποίησε) την $f(x)$

$$\text{Minimize } f(x) = \sum_{i \in V} \sum_{j \in W} \left(\frac{Z_i}{U_1} + \frac{d_{ij}}{U_2} \right) Y_{ij} \quad (1)$$

Όπου U_1 είναι η ταχύτητα επιθεώρησης σε m^2/min και U_2 είναι η ταχύτητα κίνησης των συνεργείων σε m/min .

που υπόκειται στους περιορισμούς:

$$\sum_{j \in W} X_j = P, \quad (2)$$

$$\sum_{j \in W} Y_{ij} = 1 \quad \forall i, \quad (3)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i, j \quad (4)$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall j, \quad (5)$$

$$Y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j. \quad (6)$$

όπου:

W = σύνολο πιθανών θέσεων κεντροειδών (κέντρα βάρους οικοδομικών τετραγώνων).

V = σύνολο θέσεων ζήτησης (κέντρα βάρους οικοδομικών τετραγώνων).

i, j = θέσεις που ανήκουν σε κάποιο από τα σύνολα W, V .

Z_i = ζήτηση στη θέση i

d_{ij} = απόσταση μεταξύ θέσεων i και j

P = αριθμός ζωνών / θέσεων κεντροειδών

$$X_j = \begin{cases} 1 & \text{αν η θέση } j \text{ αποτελεί θέση κεντροειδούς} \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{αν η θέση ζήτησης } i \text{ αντιστοιχεί στο κεντροειδές } j \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

Με την αντικειμενική συνάρτηση (1) επιδιώκεται η δημιουργία ζωνών, οι οποίες έχουν ελάχιστη σταθμισμένη μέση απόσταση γύρω από κάθε κεντροειδές. Ο περιορισμός (2) καθορίζει τον αριθμό των ζωνών και ο περιορισμός (3) το ότι κάθε θέση ζήτησης αντιστοιχεί σε ένα κεντροειδές. Ο περιορισμός (4) εξασφαλίζει ότι κάθε θέση ζήτησης ανήκει σε μια ζώνη. Οι περιορισμοί (5) και (6) προσδιορίζουν τις δυνατές τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών X, Y . Σύμφωνα με το παραπάνω πρότυπο, επιλέγονται εκείνες οι θέσεις i, j για τις οποίες η αντικειμενική συνάρτηση (3.6) ελαχιστοποιείται (δηλαδή επιλέγονται τα κατάλληλα $X_j=1$ και $Y_{ij}=1$). Με την επίλυση του προτύπου προκύπτουν τελικά ομάδες θέσεων i γύρω από κεντροειδή j , πλήθους P .

Ο αλγόριθμος HS ψάχνει ολόκληρες περιοχές λύσεων, ώστε να βρει το διάνυσμα βέλτιστης λύσης

$x = (x_1, \dots, x_n)$, το οποίο βελτιστοποιεί (ελαχιστοποιεί ή μεγιστοποιεί) την αντικειμενική συνάρτηση $f(x)$ όπως στην (1). Αν το πρόβλημα έχει ισοτικούς ή

ανισοτικούς περιορισμούς αυτοί περιγράφονται σαν σύνδεσμοι όπως στις (2) και (3) αντίστοιχα. Αν η μεταβλητή απόφασης έχει διακριτές τιμές το σύνολο των αποδεκτών τιμών γίνεται

$$x_k \in X_k = \{x_k(1), \dots, x_k(n), \dots, x_k(K_k)\}$$

και αν η μεταβλητή απόφασης έχει συνεχείς τιμές το σύνολο των αποδεκτών τιμών γίνεται

$$x_k^L \leq x_k \leq x_k^U. \text{ Στην περιπτώσή μας έχουμε διακριτές λύσεις.}$$

Ο αλγόριθμος HS χρησιμοποιεί μόνο την αντικειμενική συνάρτηση. Αν όμως το διάλυμα λύσης παραβιάζει κάποιο σύνδεσμο, τότε είτε απορρίπτεται το διάλυμα, είτε προσθέτει κάποια ποινή στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

4.4.2.2 Παράμετροι του HS Αλγορίθμου και Δεδομένα Πόλης.

HMS: Είναι το μέγεθος της μνήμης του αλγορίθμου. Δηλαδή ορίζει τον αριθμό των διανυσμάτων - λύσεων που κρατά - αξιοποιεί ο αλγόριθμος

HMCR: Είναι η πιθανότητα ($0 \leq HMCR \leq 1$) ο αλγόριθμος να επιλέξει μια τυχαία λύση από τη μνήμη του. Άρα για πιθανότητα $1 - HMCR$ ο αλγόριθμος θα διαλέξει μια νέα τυχαία λύση, μη αποθηκευμένη στη μνήμη.

PAR: Είναι η πιθανότητα ($0 \leq PAR \leq 1$) για την οποία ο αλγόριθμος βελτιστοποιεί μια από τις αποθηκευμένες στη μνήμη λύσεις. Άρα για πιθανότητα $1 - PAR$ ο αλγόριθμος επιλέγει μία λύση από τις αποθηκευμένες στη μνήμη και την βελτιστοποιεί.

MI: Είναι ο αριθμός επαναλήψεων που θα κάνει ο αλγόριθμος.

FW: Είναι ένα τυχαίο (αυθαίρετα επιλεγμένο μήκος) που χρησιμοποιείται για συνεχείς μεταβλητές. Εμείς ψάχνουμε διακριτές λύσεις οπότε δεν θα το εφαρμόσουμε.

Από πολλούς ερευνητές έχει προταθεί αντί για τυχαίες τιμές παραμέτρων να ορίζονται τιμές γραμμικά μεταβαλλόμενες σε κάθε επανάληψη [αναφορά] όπως για παράδειγμα με τις σχέσεις:

$$PAR(I) = PAR_{\min} + (PAR_{\max} - PAR_{\min}) * \frac{1}{MI} \quad (7)$$

$$FW(I) = FW_{\max} \exp \left[\ln \left(\frac{FW_{\min}}{FW_{\max}} \right) \frac{1}{MI} \right] \quad (8)$$

Στη βιβλιογραφία [αναφορά] αναφέρονται και τυποποιημένοι συνδυασμοί παραμέτρων που έχουν προκύψει από επαναλήψεις επιλύσεων. Επίσης υπάρχουν και προτάσεις για την ενσωμάτωση της επιλογής παραμέτρων ώστε να βελτιστοποιείται μέσω του αλγορίθμου και η επιλογή των τιμών τους[αναφορά]. Στην παρούσα διπλωματική οι τιμές των παραμέτρων θα προκύψουν με χρήση υπερκύβου δοκιμών - Latin Hypercube Sampling (LHS) ο οποίος θα περιγραφεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Επίσης γίνεται και εισαγωγή των γεωμετρικών και δομικών δεδομένων της πόλης, δηλαδή πίνακες ζήτησης, αποστάσεων και τα άλλα στοιχεία που περιγράφηκαν προηγουμένως.

4.4.2.3 Αρχική Μνήμη.

Πριν ο αλγόριθμος να μπει στο τμήμα της βελτιστοποίησης, πρέπει να δημιουργήσουμε την αρχική μνήμη. Όπως οι μουσικοί έχουν στη μνήμη τους αποθηκευμένες ακολουθίες από νότες έτσι και ο αλγόριθμος απαιτεί την προϋπαρξη μνήμης, δηλαδή λύσεων. Ο αριθμός των λύσεων αυτών καθορίζεται από το HMS. Αυτή η μνήμη μπορεί στο σύνολό να παρασταθεί από έναν πίνακα της μορφής:

$$HM = \left[\begin{array}{ccc|c} x_1^1 & \dots & x_n^1 & f(\mathbf{x}^1) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ x_1^{hms} & \dots & x_n^{hms} & f(\mathbf{x}^{hms}) \end{array} \right].$$

Επιλέγονται τυχαία P αρχικές θέσεις συνεργείων από τις 112 πιθανές. Κάθε οικοδομικό τετράγωνο αντιστοιχίζεται στο συνεργείο επιθεώρησης που βρίσκεται κοντινότερα σε αυτό. Υπολογίζεται και αποθηκεύεται στη μνήμη η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης κάθε τέτοιας λύσης. Η μικρότερη τιμή διά το P μας δίνει μια αρχική εκτίμηση του μέσου απαιτούμενου χρόνου εργασίας ανά συνεργείο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται HMS φορές για την συμπλήρωση της μνήμης.

4.4.2.4 Βελτιστοποίηση.

Οι μουσικοί της Jazz, όταν αυτοσχεδιάζουν, έχοντας ακούσει την τελευταία νότα που παίχτηκε, είτε παίζουν μια τυχαία νότα για να ακούσουν τη μελωδία που θα προκύψει, είτε ανατρέχουν στη μνήμη τους για να επιλέξουν μια νότα που σε συνδυασμό με την προηγούμενη δίνει μια μελωδία που τους αρέσει. Έτσι και ο

αλγόριθμος HS, είτε διαλέγει μια νέα τυχαία λύση, είτε τυχαία μία από τις αποθηκευμένες λύσεις, είτε βελτιστοποιεί μία από τις αποθηκευμένες λύσεις.

Αρχικά ξεκινά ένας βρόχος από 1 έως MI. Ακολούθως παράγεται ένας τυχαίος αριθμός r στο διάστημα $(0,1)$. Ανάλογα με την τιμή του r και των παραμέτρων HMCR, PAR εκτελείται μία από τις ακόλουθες λειτουργίες

Πιο συγκεκριμένα, οι τρεις λειτουργίες του αλγορίθμου είναι:

A) Τυχαία Επιλογή όταν $r < 1 - HMCR$

Επιλέγονται τυχαία P αρχικές θέσεις συνεργείων από τις 112 πιθανές. Κάθε οικοδομικό τετράγωνο αντιστοιχίζεται στο συνεργείο επιθεώρησης που βρίσκεται κοντινότερα σε αυτό. Αν κατά τη διάρκεια της ανάθεσης οικοδομικών τετραγώνων (Ο.Τ.) στα συνεργεία κάποιο από τα συνεργεία ξεπεράσει τη μέση τιμή εργασίας, τότε πολλαπλασιάζουμε τις αποστάσεις του από τα άλλα Ο.Τ. (υπό μορφής penalty) ώστε να 'δυσκολέψουμε' την ανάθεση κι άλλων Ο.Τ. σε αυτό.

B) Αξιοποίηση Μνήμης (1) όταν $r < 1 - HMCR*PAR$

Στην περίπτωση αυτή αντί όσων είδαμε προηγουμένως, ο αλγόριθμος κάνει τα εξής:

Από την HM μνήμη επιλέγονται P λύσεις. Από κάθε μία από αυτές επιλέγεται μία από τις θέσεις συνεργείου που ορίζεται σε αυτήν (με την προϋπόθεση να είναι διαφορετικές μεταξύ τους). Κάθε οικοδομικό τετράγωνο αντιστοιχίζεται στο συνεργείο επιθεώρησης που βρίσκεται κοντινότερα σε αυτό. Αν κατά τη διάρκεια της ανάθεσης οικοδομικών τετραγώνων (Ο.Τ.) στα συνεργεία κάποιο από τα συνεργεία ξεπεράσει τη μέση τιμή εργασίας, τότε πολλαπλασιάζουμε τις αποστάσεις του από τα άλλα Ο.Τ. (υπό μορφής penalty) ώστε να 'δυσκολέψουμε' την ανάθεση κι άλλων Ο.Τ. σε αυτό. Έτσι επιτυγχάνεται συνδυασμός των 'καλών' λύσεων και επιτάχυνση της βελτιστοποίησης.

Γ) Αξιοποίηση Μνήμης (2) όταν δεν εκτελείται μία από τις παραπάνω λειτουργίες

Στην περίπτωση αυτή αντί όσων είδαμε προηγουμένως, ο αλγόριθμος κάνει τα εξής:

Από την HM μνήμη επιλέγεται μία λύση. Για κάθε περιοχή ευθύνης που ορίζεται σε αυτή, υπολογίζεται το Κέντρο Βάρους της και ως αρχική θέση του κάθε συνεργείου λαμβάνεται ο κόμβος που βρίσκεται κοντινότερα στο αντίστοιχο Κέντρο Βάρους.

4.4.2.5 Έλεγχος Νέας Λύσης.

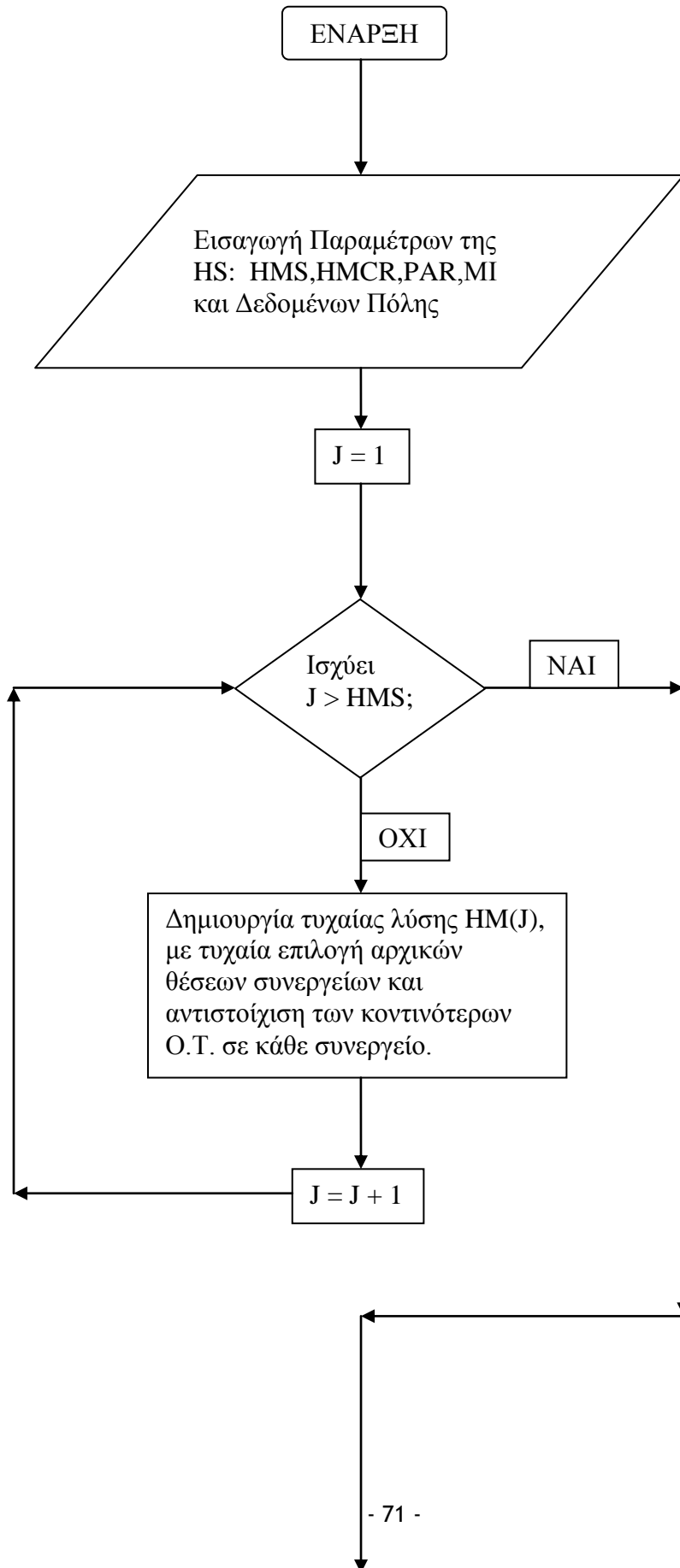
Με τη λήξη κάθε μιας από τις τρεις περιπτώσεις, προκύπτει ένα νέο διάνυσμα - λύση x^{New} . Ο αλγόριθμος ελέγχει αν η νέα λύση ικανοποιεί τους περιορισμούς του προβλήματος. Αν δεν τους ικανοποιεί τότε είτε την εγκαταλείπει. Αν ικανοποιεί τους περιορισμούς τότε ο αλγόριθμος αρχίζει τη σύγκρισή της με τις λύσεις που είναι αποθηκευμένες στη μνήμη του. Η σύγκριση αυτή γίνεται με βάση την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της κάθε λύσης. Αν η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι καλύτερη (μικρότερη) από αυτήν της χειρότερης αποθηκευμένης λύσης, τότε η νέα λύση παίρνει τη θέση της. Αλλιώς η νέα λύση εγκαταλείπεται.

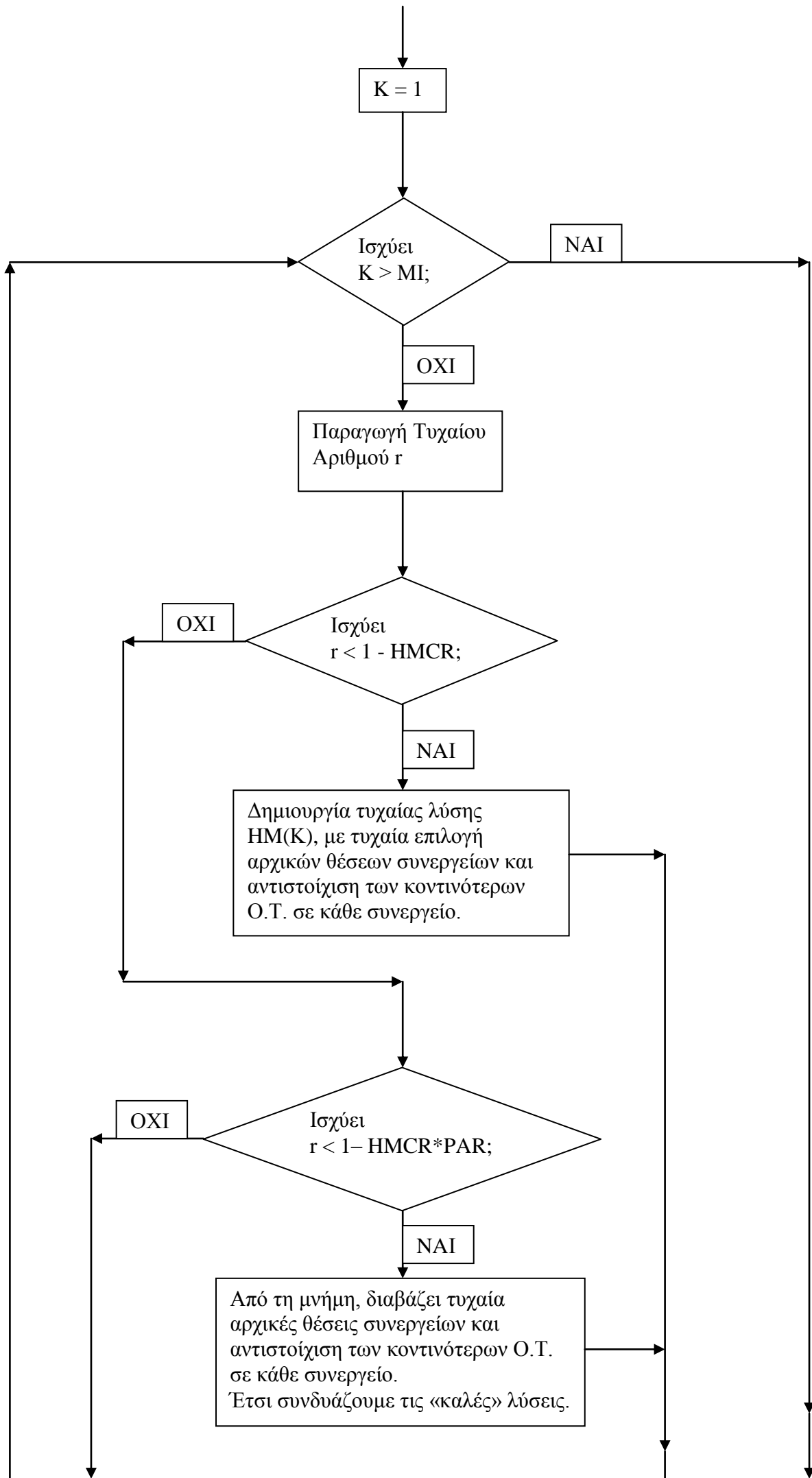
3.4.2.6 Τερματισμός Αλγορίθμου.

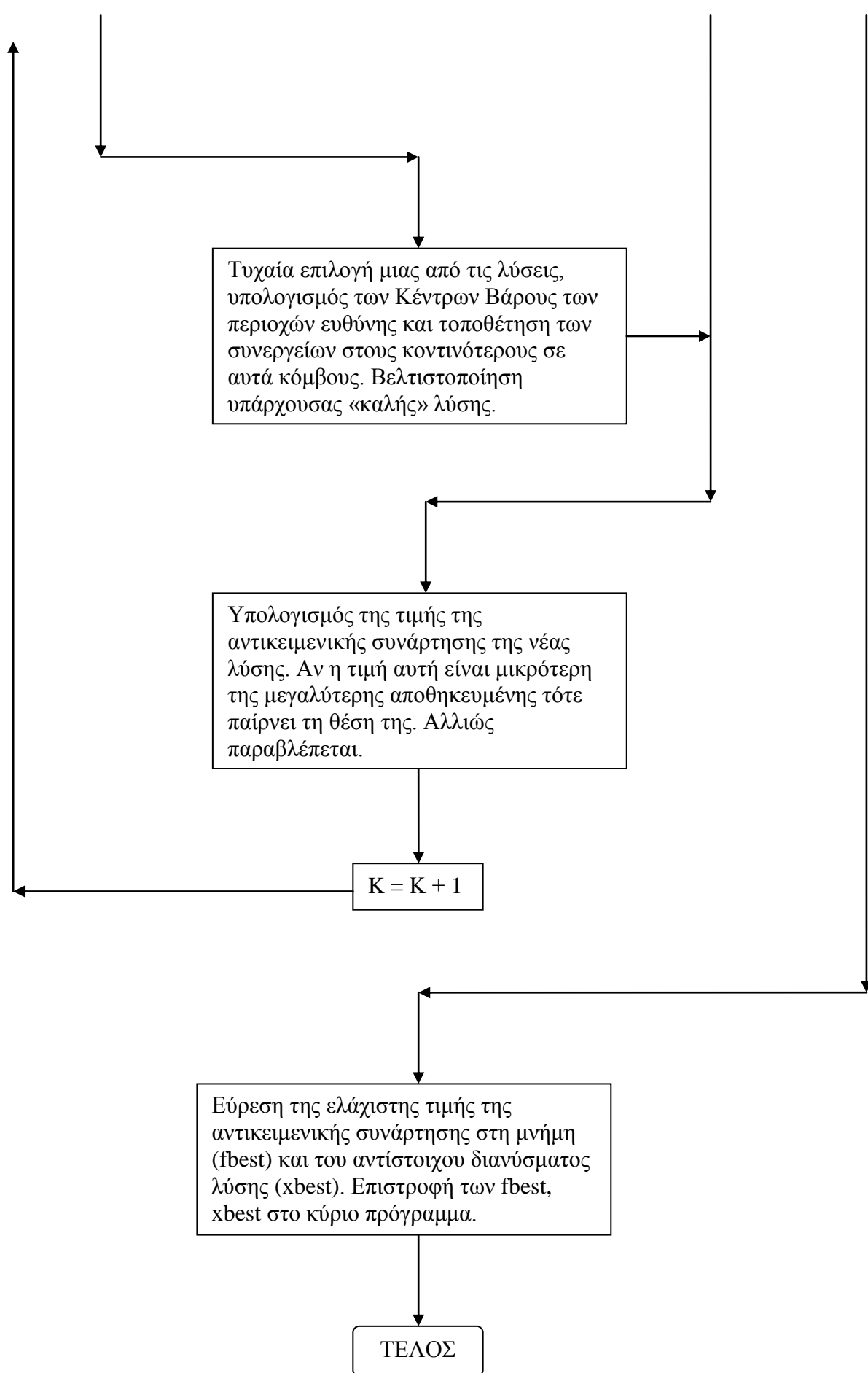
Η εκτέλεση του αλγορίθμου συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού του. Αυτό είναι η συμπλήρωση του μέγιστου αριθμού επαναλήψεων. Στο κύριο πρόγραμμα επιστρέφονται η καλύτερη (ελάχιστη) τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που προέκυψε και ο πίνακας X_{best} της λύσης αυτής. Ο πίνακας περιέχει τις περιοχές ευθύνης κάθε συνεργείου.

Ακολουθεί το Διάγραμμα Ροής του Αλγορίθμου Harmony Search Minimization (HS)

Διάγραμμα Ροής HS







4.4.3. Περιγραφή Διαδικασίας Υπολογισμού - Function ACO

Έχουμε καταστρώσει τα δεδομένα έτσι ώστε κάθε κόμβος να αντιστοιχεί σε ένα ομαδοποιημένο οικοδομικό τετράγωνο. Ο κόμβος τοποθετείται στο κέντρο βάρους του Ο.Τ. όπως αυτό ορίστηκε προηγουμένως. Κάθε Ο.Τ ενώνεται με τα άλλα για να δημιουργηθεί κάθε πιθανή διαδρομή με βάση τις ευκλείδειες συντεταγμένες. Τα μήκη των διαδρομών προκύπτουν από τις ευκλείδειες συντεταγμένες του κέντρου βάρους κάθε Ο.Τ.. Οι ποσότητες φερομόνης ξεκινούν από μια αρχική τιμή και είτε αυξάνονται (εναπόθεση) είτε μειώνονται (εξάτμιση) ανά επανάληψη όπως και στο φυσικό μοντέλο. Οι ευρεστικές τιμές, καθορίζονται από το πρόβλημα και στην περίπτωση του (TSP) είναι το αντίστροφο της απόστασης μεταξύ δύο κόμβων για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς.

Σε κάθε επανάληψη, καθένα μυρμήγκι ξεκινά από τυχαίο κόμβο και μετακινείται εντός του γραφήματος κρατώντας στη μνήμη του τους κόμβους που έχει επισκεφθεί και τη σειρά με την οποία τους επισκέφθηκε. Η επιλογή του επόμενου προς επίσκεψη κόμβου γίνεται πιθανοτικά ανάμεσα από αυτούς που δεν έχουν ακόμα επισκεφθεί. Κριτήρια της επιλογής αυτής είναι οι υπάρχουσες ποσότητες φερομόνης και οι ευρεστικές πληροφορίες (επιθυμία μετακίνησης). Όταν έχουν επισκεφθεί όλοι οι κόμβοι από το μυρμήγκι, έχουμε καταστρώσει μια λύση. Όταν ολοκληρωσεί ο πληθυσμός έχει ολοκληρώσει τις διαδρομές του, τότε αρχικά μειώνουμε τις αρχικές τιμές φερομόνης κάθε ένωσης κόμβων κατά ένα συγκεκριμένο ποσοστό και μετά τις αυξάνουμε κατά μια τιμή που καθορίζεται από την “ποιότητα” της λύσης στην οποία ανήκει.

4.4.3.1 Λειτουργία Αλγορίθμου ACO

Αρχικά ο αλγόριθμος διαβάζει τα δεδομένα που χρειάζεται, τα οποία είναι:

- A) ο πίνακας συντεταγμένων C των κόμβων που πρέπει να επισκεφτούν,
- B) το πλήθος των μυρμηγκιών m ,
- Γ) οι παράμετροι α (βαθμός επιρροής φερομόνης), β (βαθμός επιρροής επιθυμίας μετακίνησης), ρ (ρυθμός εξάτμισης φερομόνης), q (ρυθμός εναπόθεσης φερομόνης από το μυρμήγκι, NC_{max} (οι συνολικές επαναλήψεις)

Ακολουθεί υπολογισμός του πίνακα αποστάσεων κόμβων D όπου αν n είναι το σύνολο των κόμβων προς επίσκεψη, ο D έχει διαστάσεις $n \times n$. Επίσης υπολογίζεται και ο πίνακας T που περιέχει την επιθυμία μετακίνησης μεταξύ δύο κόμβων που δίνεται από το αντίστροφο της μεταξύ τους απόστασης.

Ξεκινά ο βρόχος του συνολικού αριθμού επαναλήψεων του αλγορίθμου από $NC = 1$ έως $NC = NC_{max}$.

Καθένα από τα m μυρμήγκια τοποθετείται σε τυχαία επιλεγμένους m κόμβους και στη μνήμη του σημειώνεται ότι ο κόμβος αυτός έχει επισκεφθεί. Ξεκινά ένας δεύτερος βρόχος από 2 έως n . Σε κάθε επανάληψη του βρόχου, κάθε μυρμήγκι φτιάχνει μια διαδρομή επισκεπτόμενο έναν κόμβο διαδοχικά. Εντός μιας επανάληψης υπάρχει η διαδικασία απόφασης στην οποία κάθε μυρμήγκι (k) που βρίσκεται σε κάποιον κόμβο (i), αποφασίζει ποιός θα είναι ο επόμενος προς επίσκεψη κόμβος. Η απόφαση αυτή λαμβάνεται με βάση έναν πιθανοτικό κανόνα που ονομάζεται αναλογικά τυχαίος κανόνας. Στην διαδικασία απόφασης χρησιμοποιείται και η μνήμη M_k του k μυρμηγκιού που περιέχει τους κόμβους που έχει ήδη επισκεφθεί με τη σειρά επίσκεψης. Από τη μνήμη αυτή δημιουργείται το σύνολο N_{ki} των κόμβων που δεν έχει επισκεφθεί το k . Άρα η πιθανότητα να μεταβεί το μυρμήγκι k από τον κόμβο i , στον οποίο βρίσκεται, στον κόμβο j είναι:

$$p_{i,j}^k = \frac{(\tau_{i,j})^a * (n_{i,j})^\beta}{\sum_{l \in N_{ki}^k} ((\tau_{i,l})^a * (n_{i,l})^\beta)}, \text{ if } j \in N_{ki}^k \quad (1)$$

όπου $\tau_{i,j}$ είναι η ποσότητα φερομόνης στην ένωση των κόμβων i και j , a είναι η παράμετρος που ορίζει την επίδραση του $\tau_{i,j}$, β είναι η παράμετρος που ορίζει την επίδραση του $n_{i,j}$, με το $n_{i,j}$ να είναι οι ευρεστικές πληροφορίες που καθορίζουν την πρόκληση επιθυμίας μετακίνησης ανάμεσα στους κόμβους i, j .

$$n_{i,j} = \frac{1}{d_{i,j}} \quad (2)$$

Σύμφωνα με την (2), η επιθυμία μετακίνησης από τον κόμβο i στον κόμβο j είναι αντιστρόφως ανάλογη της μεταξύ τους απόστασης. Εξ ορισμού αποκλείουμε την περίπτωση επιλογής κόμβου εκτός του συνόλου N_{ki} ενώ η πιθανότητα επιλογής συγκεκριμένης μετακίνησης εξαρτάται από την τιμή της φερομόνης που υπάρχει στη διαδρομή της μετακίνησης αυτής.

Αφού ληφθεί η απόφαση, κάθε μυρμήγκι τοποθετείται στον καινούριο του κόμβο και ο κόμβος αυτός σημειώνεται στη μνήμη με αυτούς που έχουν επισκεφθεί.

Αφού όλα τα m μυρμήγκια έχουν κατασκευάσει τις διαδρομές τους (έχουν επισκεφθεί όλους τους κόμβους), ολοκληρώνεται ο εσωτερικός βρόχος. Ο αλγόριθμος υπολογίζει το μήκος διαδρομής κάθε μυρμηγκιού. Από τα μήκη αυτά συγκρατεί το μικρότερο και τη διαδρομή που αντιστοιχεί σε αυτό Συγκρίνει το μήκος αυτό με το ελάχιστο μήκος που προέκυψε από προηγούμενες επαναλήψεις και αν είναι μικρότερο, το αποθηκεύει στη θέση του προηγούμενου μαζί με τη διαδρομή του. Διαφορετικά, το απορρίπτει και συνεχίζει. Έπειτα ανανεώνει τις υπάρχουσες ποσότητες φερομόνης πριν την έναρξη της επόμενης επανάληψης ($t+1$) με βάση τον εξής κανόνα:

$$\tau_{i,j}(t+1) = (1 - \rho) * \tau_{i,j}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{i,j}^k(t), \forall (i, j) \in A \quad (3)$$

όπου ρ είναι ο ρυθμός εξάτμισης της φερομόνης, A είναι το σύνολο των ενώσεων (διαδρομών) μεταξύ των κόμβων και $\Delta\tau_{i,j}^k(t)$ είναι η ποσότητα της φερομόνης που το k μυρμήγκι αφήνει στη διαδρομή που διέσχισε κατά την συνολική μετακίνησή του.

Το $\Delta\tau_{i,j}^k(t)$ δίνεται από την:

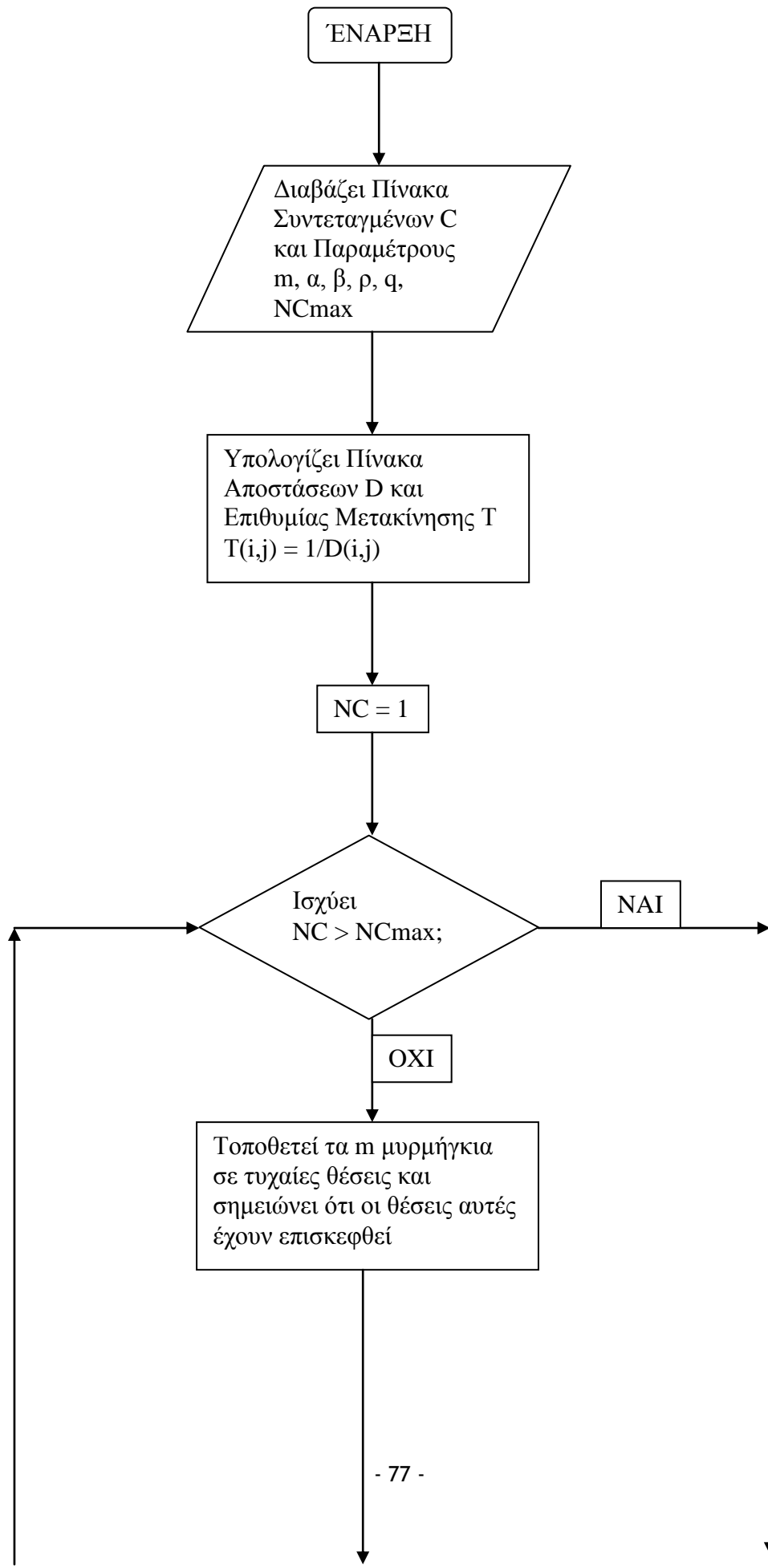
$$\Delta\tau_{i,j}^k = \begin{cases} \frac{1}{L(T_k)} & \text{if connection } (i, j) \text{ belongs to } T^k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

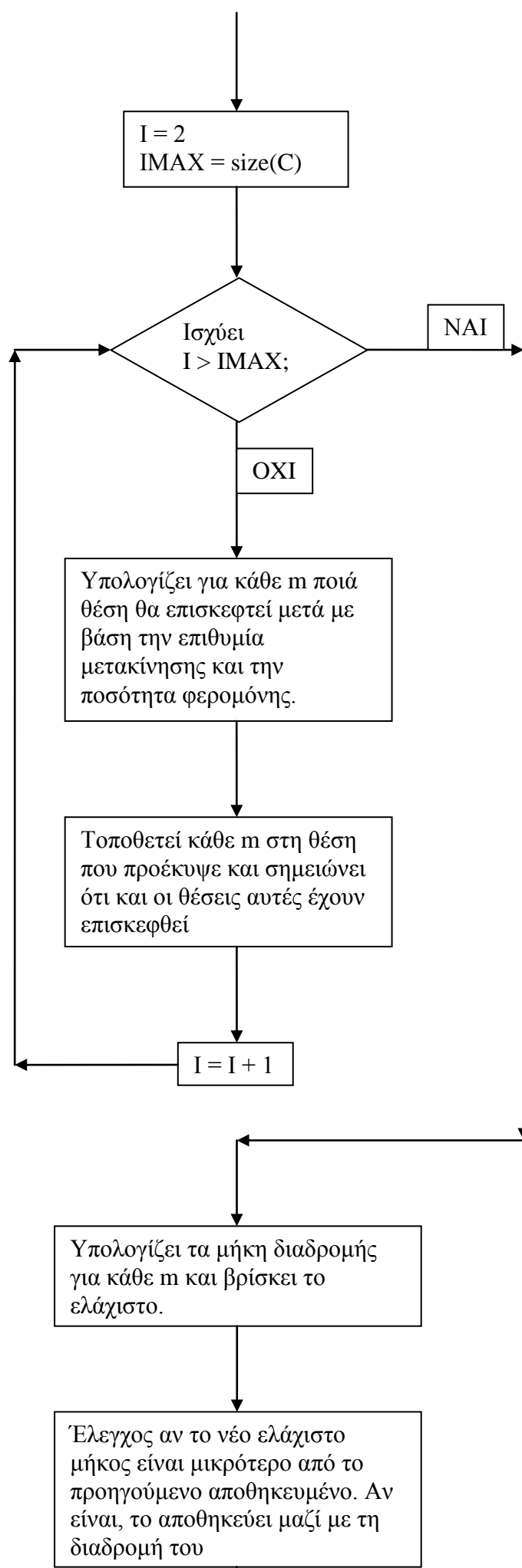
Το ρ πρέπει να παίρνει τιμές <1 ώστε να αποφευχθεί η συσσώρευση φερομόνης στο μονοπάτι. Σε γενικές γραμμές, τα μονοπάτια που διασχίζονται από περισσότερα μυρμήγκια και ανήκουν σε συντομότερες συνολικές διαδρομές θα έχουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις φερομόνης και συνεπώς περισσότερες πιθανότητες να επιλεγούν από μυρμήγκια σε επόμενες επαναλήψεις

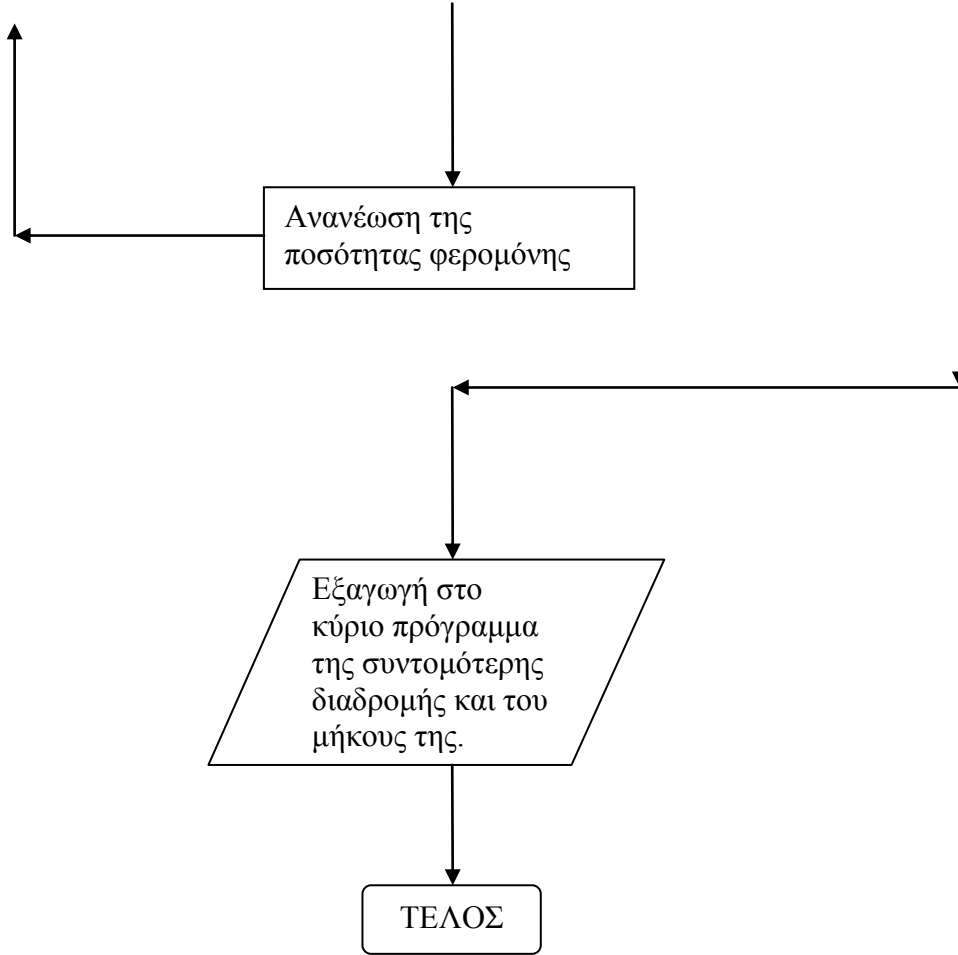
Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως $NC > NC_{max}$. Τότε ολοκληρώνεται και ο εξωτερικός βρόχος. Ο αλγόριθμος ACO επιστρέφει στο κύριο πρόγραμμα την βέλτιστη διαδρομή που προέκυψε και το μήκος αυτής και τερματίζει τη λειτουργία του.

Ακολουθεί το Διάγραμμα Ροής του Ant Colony Optimization:

Διάγραμμα Ροής ACO







Ολοκληρώθηκε η περιγραφή λειτουργίας του αλγορίθμου που συντάχθηκε για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Θα ακολουθήσει κεφάλαιο με τις επιλύσεις και την ανάλυση ευαισθησίας ενώ θα παρουσιαστεί αναλυτικά η μέση καλύτερη και χειρότερη λύση.

Επίλυση και Ανάλυση Ευαισθησίας

5.1. Γενικά

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η διαδικασία λειτουργίας του αλγορίθμου. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι επιλύσεις που έγιναν.

Για την όσο το δυνατόν ασφαλή εξαγωγή συμπερασμάτων γύρω από την αποτελεσματικότητα του προτύπου πραγματοποιείται ένα μεγάλο εύρος επιλύσεων.

Γίνεται δηλαδή ανάλυση ευαισθησίας γύρω από τις παραμέτρους των γενετικών αλγορίθμων και σύγκριση των αποτελεσμάτων με σκοπό να βρεθεί πως αυτές επηρεάζουν τη βελτιστοποίηση.

Ακολουθεί στατιστική επεξεργασία των εξαγόμενων αποτελεσμάτων, ανάλυση τους και παρουσίαση τους με γραφήματα.

5.2. Οι παράμετροι του γενετικού αλγορίθμου

Όπως έχει αναφερθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο, κατά την εκκίνηση του προγράμματος, δίνονται τιμές σε όλες τις παραμέτρους. Οι παράμετροι αυτές είναι:

- 1) Ταχύτητα Κίνησης των Συνεργείων Ομάδας (Vtrav)
- 2) Ταχύτητα Επιθεώρησης των Συνεργείων Ομάδας (Vinsp)
- 3) Μέγεθος Μνήμης Harmony (HMS)
- 4) Καθορισμός Πιθανότητας 1^{ης} Λειτουργίας Harmony (HMCR)
- 5) Καθορισμός Πιθανότητας 2^{ης} Λειτουργίας Harmony (PAR)
- 6) Αριθμός Επαναλήψεων Βρόχου Harmony (MI)
- 7) Πλήθος Μελών Αποικίας Μυρμηγκιών ACO (m)
- 8) Βαθμός Επιρροής Φερομόνης (α)
- 9) Βαθμός Επιρροής Επιθυμίας Μετακίνησης (β)
- 10) Ρυθμός Εξάτμισης Φερομόνης (ρ)
- 11) Ρυθμός Εναπόθεσης Φερομόνης (q)
- 12) Αριθμός Επαναλήψεων Βρόχου ACO (NCmax)

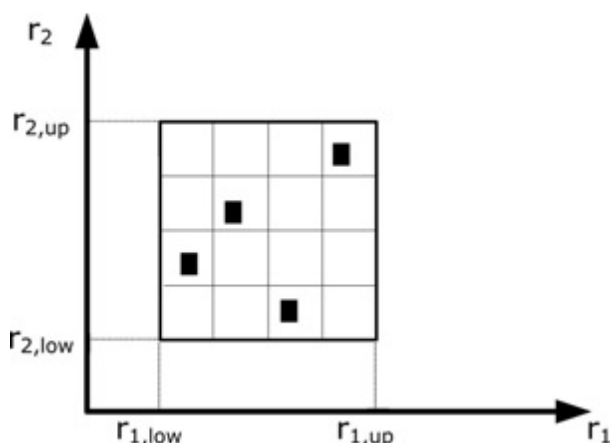
Από τις παραμέτρους αυτές, σταθερές τιμές για το σύνολο των επιλύσεων έχουν μόνο οι αριθμοί επαναλήψεων των βρόχων των HS, ACO. Οι υπόλοιπες 10 παράμετροι έχουν μεταβλητές τιμές. Λόγω του μεγάλου αριθμού μεταβαλλόμενων

παραμέτρων, γίνεται χρήση υπερκύβου παραμέτρων. Ο υπερκύβος παράγεται με τη μέθοδο Latin Hypercube Sampling (LHS)[αναφορά].

5.2.1. Η Μέθοδος Latin Hypercube Sampling (LHS)

Η ιδέα για τη μέθοδο αυτή προτάθηκε από τον McKay et al. (1979) σε μια προσπάθεια να μειωθεί ο υπολογιστικός φόρτος της μεθοδολογίας τυχαίας επιλογής δειγμάτων.

Στο πλαίσιο της στατιστικής δειγματοληψίας, ο Latin υπερκύβος είναι ένα τετράγωνο πλέγμα που αποτελείται από θέσεις - δείγματα αν και μόνο αν υπάρχει μόνο ένα δείγμα σε κάθε γραμμή και στήλη στο διδιάστατο χώρο όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 5.1

Γενικεύοντας για ένα χώρο M διαστάσεων, ο Latin υπερκύβος M διαστάσεων ορίζεται ως ο υπερκύβος όπου κάθε του δείγμα είναι μοναδικό σε κάθε άξονα - ευθυγραμμισμένο υπερεπίπεδο που το περιέχει.

Δηλαδή, τα δείγματα δημιουργούνται από τη διαίρεση M μεταβλητών σε N μη επικαλυπτόμενα τμήματα ίσης πιθανότητας. Έτσι ο χώρος διαστάσεων M παραμέτρων χωρίζεται σε N^M δείγματα. Για κάθε τυχαία μεταβλητή επιλέγεται τυχαία μόνο μια τιμή από κάθε δείγμα παράγοντας ένα σύνολο N τιμών.

Οι τιμές της κάθε τυχαίας μεταβλητής ομαδοποιούνται μεταξύ τους για τη δημιουργία N δειγμάτων. Ο αριθμός N πρέπει να είναι ίδιος για όλες τις μεταβλητές. Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι πως το πλήθος των δειγμάτων είναι ανεξάρτητο του πλήθους των μεταβλητών.

Στο παρόν πρόβλημα το εύρος τιμών των παραμέτρων είναι:

- 1) Ταχύτητα Κίνησης Συνεργείων V_{trav} E [8,00 , 12,00] km/hour
- 2) Ταχύτητα Επιθεώρησης Συνεργείων V_{insp} E [41.67 , 62.50] m²/min
- 3) Μέγεθος Μνήμης Harmony HMS E [5 , 20]
- 4) Καθορισμός Πιθανότητας 1^{ης} Λειτουργίας Harmony HMCR E (0.00 , 0.30]
- 5) Καθορισμός Πιθανότητας 2^{ης} Λειτουργίας Harmony PAR E (0.00 , 1.00)
- 6) Αριθμός Επαναλήψεων Βρόχου Harmony MI = 200000 Σταθερό
- 7) Πλήθος Μελών Αποικίας Μυρμηγκιών ACO m E [1 , 100]
- 8) Βαθμός Επιρροής Φερομόνης α E [0,00 , 2,00]
- 9) Βαθμός Επιρροής Επιθυμίας Μετακίνησης β E [-1,00 , 1,00]
- 10) Ρυθμός Εξάτμισης Φερομόνης ρ E [0,00 , 1,00)
- 11) Ρυθμός Εναπόθεσης Φερομόνης q E [0,00 , 1,00]
- 12) Αριθμός Επαναλήψεων Βρόχου ACO NCmax = 400 Σταθερός

Επιλέγεται πλήθος επιλύσεων για το γενετικό αλγόριθμο ίσο με 32. Με αυτό τον τρόπο πραγματοποιούνται επιλύσεις που λαμβάνουν υπόψη το συνδυασμό όλων των παραπάνω παραμέτρων. Οι συνδυασμοί των παραμέτρων που έδωσε ο υπερκύβος LHS είναι:

Τιμές Παραμέτρων LHS										
Παράμετροι Harmony Search					Παράμετροι Ant Colony Optimization					
Επ/ληψη	HMS	HMCR	Par	MI	m	Alpha	Beta	Rho	Q	Ncmax
1	11	0,0904	0,171	200000	76	0,718	0,243	0,818	0,697	400
2	20	0,1392	0,853	200000	17	1,043	0,675	0,961	0,269	400
3	11	0,002	0,913	200000	60	1,775	0,59	0,711	0,455	400
4	12	0,0981	0,698	200000	63	0,906	0,965	0,21	0,306	400
5	15	0,269	0,585	200000	52	1,239	-0,833	0,025	0,57	400
6	17	0,2399	0,251	200000	73	1,137	-0,07	0,22	0,632	400
7	8	0,0494	0,739	200000	94	1,459	-0,175	0,627	0,111	400
8	6	0,2308	0,463	200000	72	1,966	-0,036	0,878	0,623	400
9	20	0,0719	0,638	200000	11	1,569	-0,482	0,53	0,385	400
10	18	0,186	0,985	200000	14	0,434	0,698	0,866	0,049	400
11	9	0,1465	0,055	200000	43	1,732	-0,452	0,083	0,002	400
12	10	0,1726	0,658	200000	29	0,277	-0,278	0,118	0,352	400
13	7	0,2499	0,235	200000	64	0,594	0,894	0,469	0,864	400
14	16	0,0162	0,815	200000	99	0,329	-0,205	0,397	0,769	400
15	7	0,2601	0,121	200000	21	1,908	0,936	0,416	0,214	400
16	8	0,2076	0,397	200000	69	0,004	0,415	0,298	0,323	400
17	15	0,1075	0,299	200000	26	1,378	-0,303	0,908	0,744	400
18	5	0,0595	0,081	200000	88	1,333	0,75	0,551	0,222	400
19	5	0,0444	0,314	200000	9	0,53	0,404	0,128	0,968	400
20	16	0,1979	0,525	200000	54	0,637	0,812	0,774	0,092	400
21	10	0,0753	0,414	200000	79	0,986	-0,869	0,684	0,538	400
22	13	0,1646	0,002	200000	87	0,757	0,1	0,993	0,499	400
23	12	0,1512	0,201	200000	33	0,205	0,61	0,736	0,816	400
24	17	0,1889	0,904	200000	25	1,261	0,521	0,318	0,507	400
25	14	0,2891	0,373	200000	36	1,118	-0,647	0,792	0,903	400
26	9	0,1217	0,793	200000	96	1,652	-0,126	0,17	0,174	400
27	19	0,2212	0,962	200000	48	1,82	-0,976	0,354	0,982	400
28	13	0,128	0,601	200000	82	0,824	-0,558	0,459	0,669	400
29	6	0,293	0,49	200000	6	1,558	-0,73	0,267	0,931	400
30	18	0,0269	0,142	200000	45	0,153	-0,017	0,604	0,151	400
31	19	0,2722	0,548	200000	1	0,438	0,354	0,584	0,797	400
32	14	0,0356	0,771	200000	41	0,076	0,322	0,051	0,422	400

Πίνακας 5.2

Τιμές Παραμέτρων Από LHS	
Ταχύτητες	
Vinsp (m ² /min)	Vtrav (m/h)
54,954	9704,541
48,957	8889,289
57,762	11103,711
61,626	9357,569
49,760	10392,581
43,982	10003,978
60,444	10628,179
44,816	10189,488
45,678	10269,520
41,472	9286,010
45,048	9503,709
48,551	8631,501
43,303	10554,749
54,313	10830,081
49,429	8033,075
51,214	9972,265
50,359	9665,266
52,894	11672,947
46,457	9867,325
54,040	11237,798
51,486	8994,441
47,179	8233,932
56,262	8847,620
48,080	9124,211
51,869	10723,095
46,107	10931,307
57,460	9785,287
47,338	10486,603
53,134	10104,386
52,283	11363,914
50,669	12655,629
47,968	9538,920

Πίνακας 5.3

5.3. Τα Αποτελέσματα των Επιλύσεων

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, γίνεται η επιλογή παραμέτρων του αλγορίθμου ανάλογα με την επανάληψη. Σε κάθε ομάδα συνεργείων ως χρόνος ολοκλήρωσης της επιθεώρησης λαμβάνεται ο μέγιστος από τους υπολογισμένους χρόνους για κάθε μέλος της. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των 32 επιλύσεων φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Χρόνος Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης Ανά Ομάδα (σε ώρες)						
Επ/ληψη	2 Συνεργεία	3 Συνεργεία	4 Συνεργεία	5 Συνεργεία	6 Συνεργεία	7 Συνεργεία
1	3061,121	1974,020	1544,240	1233,483	1028,762	928,586
2	3434,764	2136,917	1698,557	1384,427	1281,169	1088,894
3	2911,023	1832,891	1460,864	1170,008	978,686	1065,546
4	2728,812	1710,103	1390,576	1099,849	1017,879	832,754
5	3382,259	2104,057	1687,041	1362,483	1260,588	1137,087
6	3825,152	2396,948	1964,772	1615,200	1330,662	1214,754
7	2784,583	1732,421	1430,930	1118,558	935,327	1018,449
8	3754,578	2335,681	1837,614	1512,661	1212,751	1201,792
9	3683,975	2292,135	1859,536	1483,985	1253,654	1238,649
10	4054,827	2522,696	2034,988	1634,117	1397,630	1303,123
11	3735,557	2351,925	1885,415	1634,550	1254,843	1256,000
12	3466,900	2156,769	1741,266	1392,575	1181,544	1113,499
13	3883,031	2444,692	1958,297	1716,984	1248,082	1306,173
14	3098,356	1927,583	1556,089	1219,407	1054,407	995,274
15	3402,366	2142,057	1707,423	1437,442	1093,637	1093,489
16	3285,213	2043,845	1657,593	1319,900	1233,389	958,691
17	3341,875	2094,464	1678,945	1438,233	1104,633	1123,655
18	3178,561	1977,617	1631,348	1391,313	1068,667	993,279
19	3620,590	2252,558	1772,332	1584,512	1224,307	1213,528
20	3111,540	1935,983	1525,620	1254,098	1046,051	1046,705
21	3270,174	2058,936	1680,661	1313,442	1108,983	1195,744
22	3566,446	2218,706	1799,392	1505,990	1209,951	1145,724
23	2990,524	1860,559	1508,676	1262,953	988,168	949,813
24	3497,306	2175,867	1763,854	1409,569	1298,856	1176,462
25	3244,778	2033,368	1605,999	1369,973	1150,285	1042,298
26	3649,111	2297,333	1841,386	1570,380	1237,966	1168,079
27	2930,290	1823,029	1472,243	1180,256	1091,892	941,069
28	3554,934	2211,614	1826,334	1555,483	1205,932	1137,912
29	3167,903	1985,210	1591,349	1276,012	1084,419	1017,474
30	3218,206	2026,023	1623,958	1408,178	1174,254	1177,237
31	3321,317	2066,414	1675,966	1402,289	1126,686	1066,946
32	3507,551	2261,477	1770,029	1509,586	1200,933	1283,147

Πίνακας 5.4

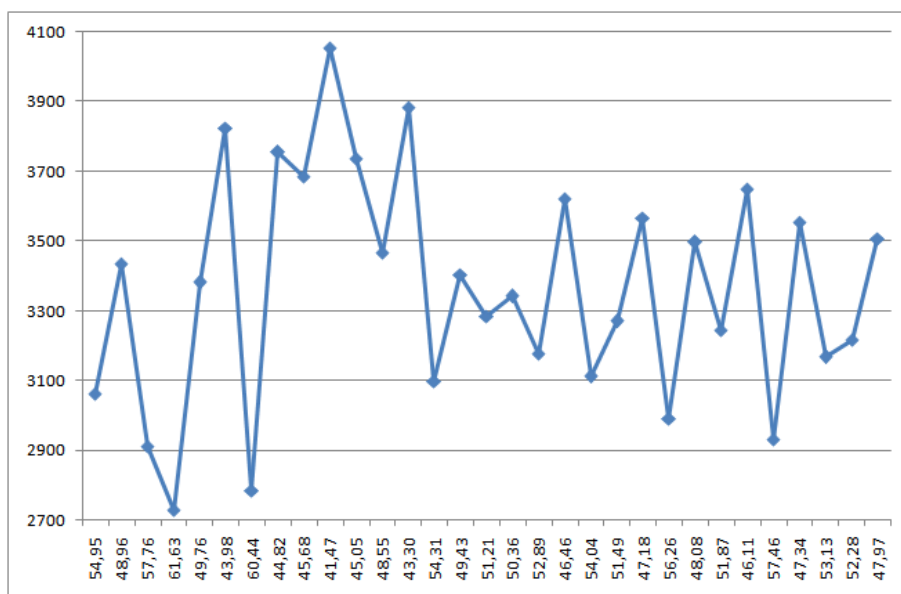
Οι υπολογισμένοι χρόνοι είναι με διαφορετικές ταχύτητες κίνησης και επιθεώρησης σε κάθε επανάληψη. Για την σύγκρισή τους θα γίνει αναγωγή τους σε μέση ταχύτητα κίνησης 10km/hour και μέση ταχύτητα επιθεώρησης 50m²/min.

Τα ομογενοποιημένα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Ομογενοποιημένοι Χρόνοι Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης Ανά Ομάδα (σε ώρες)						
Επαν/ψη	2 Συνεργεία	3 Συνεργεία	4 Συνεργεία	5 Συνεργεία	6 Συνεργεία	7 Συνεργεία
1	3364,048	2169,417	1696,954	1355,591	1130,596	1020,534
2	3362,918	2092,213	1662,984	1355,468	1254,378	1066,116
3	3362,888	2117,389	1687,612	1351,626	1015,071	1230,952
4	3362,809	2107,358	1713,497	1355,388	1254,378	1025,997
5	3366,233	2094,082	1679,148	1355,994	1254,568	1131,665
6	3365,267	2108,769	1728,793	1420,877	1170,600	1068,607
7	3365,621	2093,904	1729,200	1352,059	1130,597	1231,096
8	3365,871	2093,854	1647,302	1355,977	1087,087	1077,267
9	3382,534	2094,378	1699,311	1355,835	1145,400	1131,687
10	3363,458	2092,572	1688,072	1355,469	1159,307	1080,910
11	3365,812	2119,145	1698,892	1472,734	1130,597	1131,646
12	3365,854	2093,916	1690,315	1352,085	1147,161	1081,139
13	3363,292	2117,508	1696,266	1487,146	1081,018	1131,312
14	3365,591	2093,839	1690,297	1324,584	1145,420	1081,119
15	3363,051	2117,277	1687,620	1420,863	1080,997	1080,881
16	3364,849	2093,388	1697,742	1351,911	1263,299	981,937
17	3365,681	2109,367	1690,813	1448,510	1112,516	1131,685
18	3362,691	2092,195	1725,894	1471,908	1130,596	1050,825
19	3364,234	2093,071	1646,828	1472,302	1137,591	1127,577
20	3363,011	2092,456	1648,921	1355,450	1130,596	1131,293
21	3366,562	2119,591	1729,848	1352,283	1141,825	1231,169
22	3364,695	2093,204	1697,462	1420,912	1141,603	1080,991
23	3364,205	2093,026	1696,990	1420,920	1111,701	1068,620
24	3362,911	2092,248	1696,048	1355,406	1248,948	1131,258
25	3366,245	2109,491	1666,185	1421,221	1193,306	1081,293
26	3365,707	2118,929	1698,631	1448,261	1141,674	1077,227
27	3366,564	2094,446	1691,084	1356,119	1254,659	1081,320
28	3366,175	2094,183	1729,590	1472,831	1141,806	1077,410
29	3366,228	2109,485	1690,873	1355,941	1152,312	1081,215
30	3365,496	2118,754	1698,403	1472,581	1227,943	1231,037
31	3366,915	2094,819	1699,313	1421,270	1141,938	1081,433
32	3365,006	2169,575	1698,088	1448,241	1152,132	1231,005

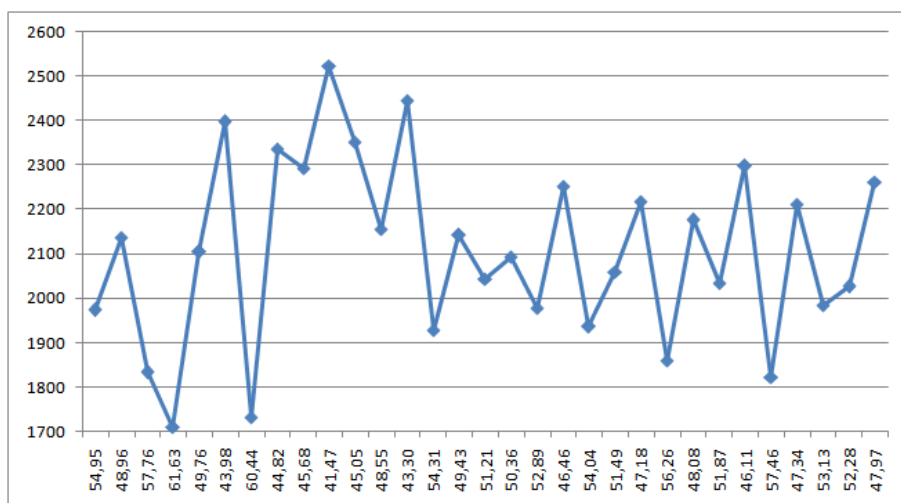
Πίνακας 5.5

Στη συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα του χρόνου ολοκλήρωσης επιθεώρησης με την ταχύτητα επιθεώρησης για κάθε ομάδα συνεργείων



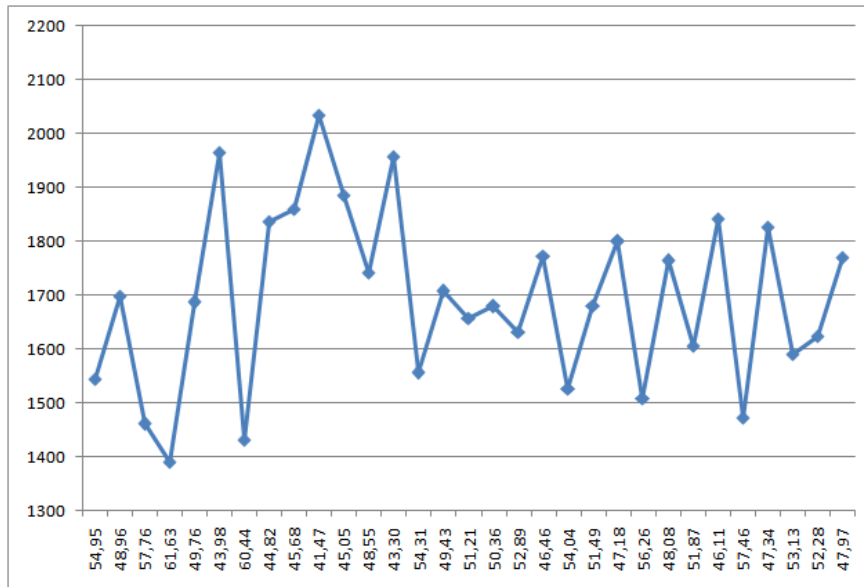
Διάγραμμα Χρόνου Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης - Ταχύτητας Επιθεώρησης για Ομάδα 2 Συνεργείων
 Άξονας Χ : Ταχύτητα Επιθεώρησης (τ.μ./λεπτό)
 Άξονας Υ : Χρόνος σε Ωρες

Πίνακας 5.6.1



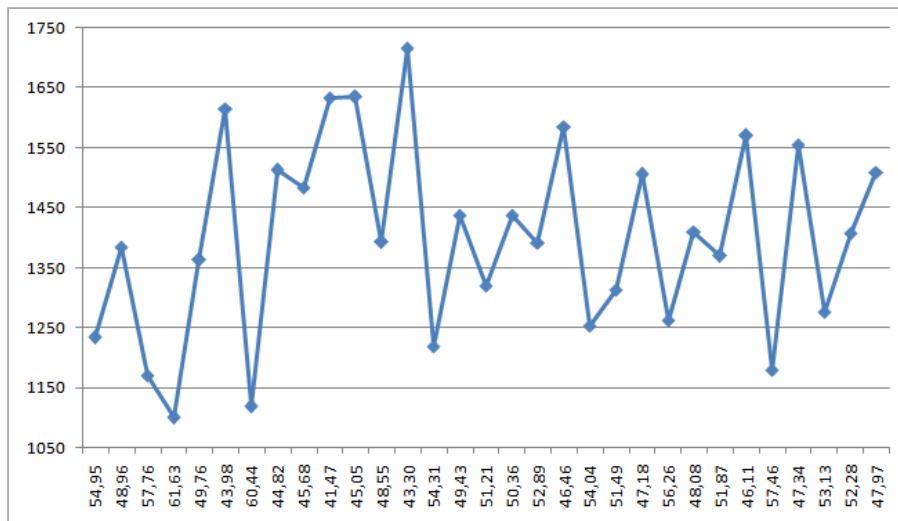
Διάγραμμα Χρόνου Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης - Ταχύτητας Επιθεώρησης για Ομάδα 3ων Συνεργείων
 Άξονας Χ : Ταχύτητα Επιθεώρησης (τ.μ./λεπτό)
 Άξονας Υ : Χρόνος σε Ωρες

Πίνακας 5.6.2



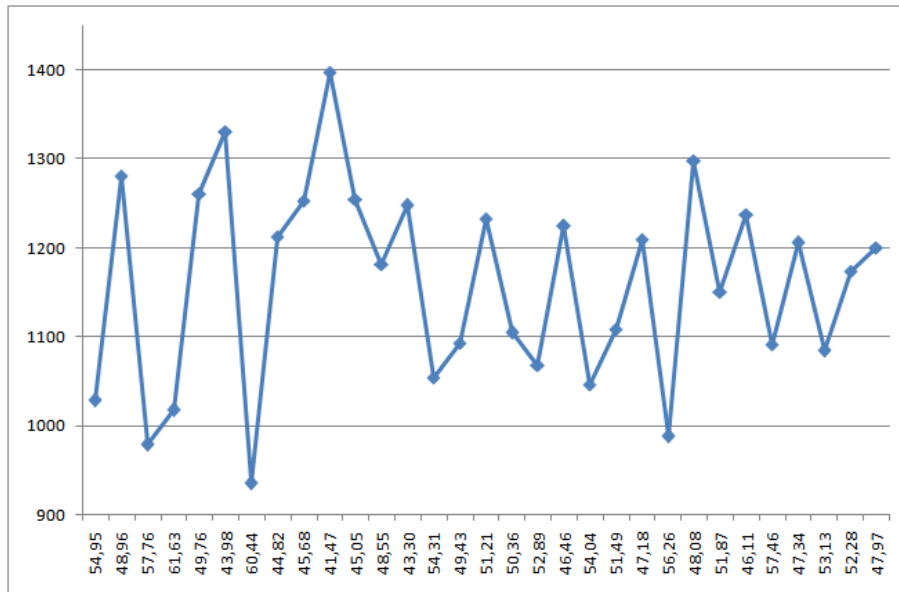
Διάγραμμα Χρόνου Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης - Ταχύτητας Επιθεώρησης για Ομάδα 4ων Συνεργείων
 Άξονας X : Ταχύτητα Επιθεώρησης (τ.μ./λεπτό)
 Άξονας Y : Χρόνος σε Ωρες

Πίνακας 5.6.3



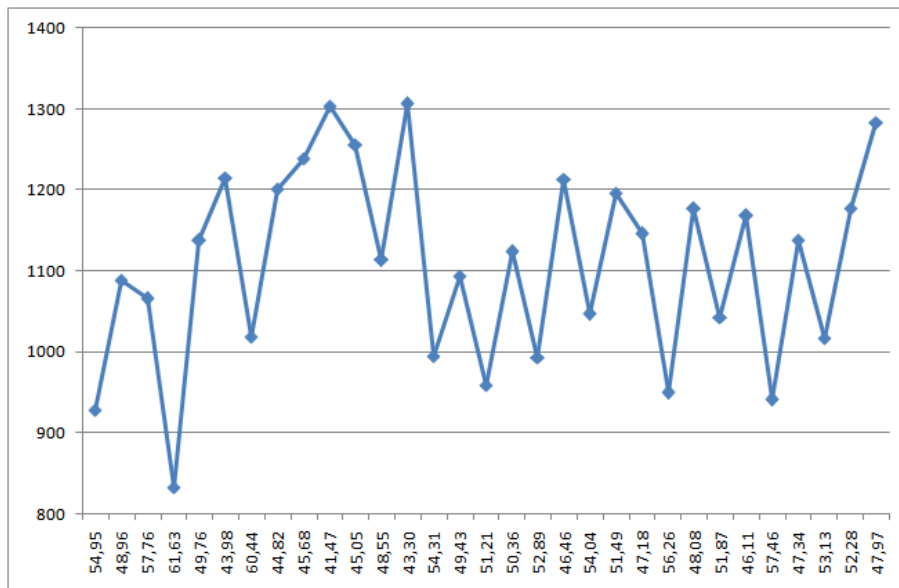
Διάγραμμα Χρόνου Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης - Ταχύτητας Επιθεώρησης για Ομάδα 5 Συνεργείων
 Άξονας X : Ταχύτητα Επιθεώρησης (τ.μ./λεπτό)
 Άξονας Y : Χρόνος σε Ωρες

Πίνακας 5.6.4



Διάγραμμα Χρόνου Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης - Ταχύτητας Επιθεώρησης για Ομάδα 6 Συνεργειών
 Άξονας X : Ταχύτητα Επιθεώρησης (τ.μ./λεπτό)
 Άξονας Y : Χρόνος σε Ωρες

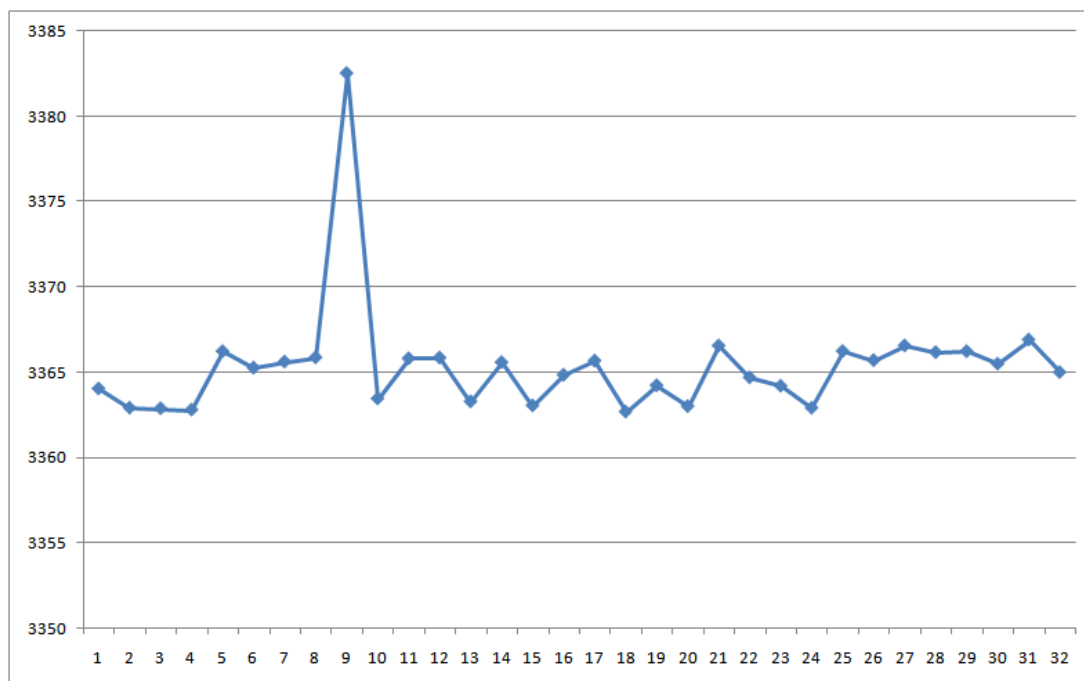
Πίνακας 5.6.5



Διάγραμμα Χρόνου Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης - Ταχύτητας Επιθεώρησης για Ομάδα 7 Συνεργειών
 Άξονας X : Ταχύτητα Επιθεώρησης (τ.μ./λεπτό)
 Άξονας Y : Χρόνος σε Ωρες

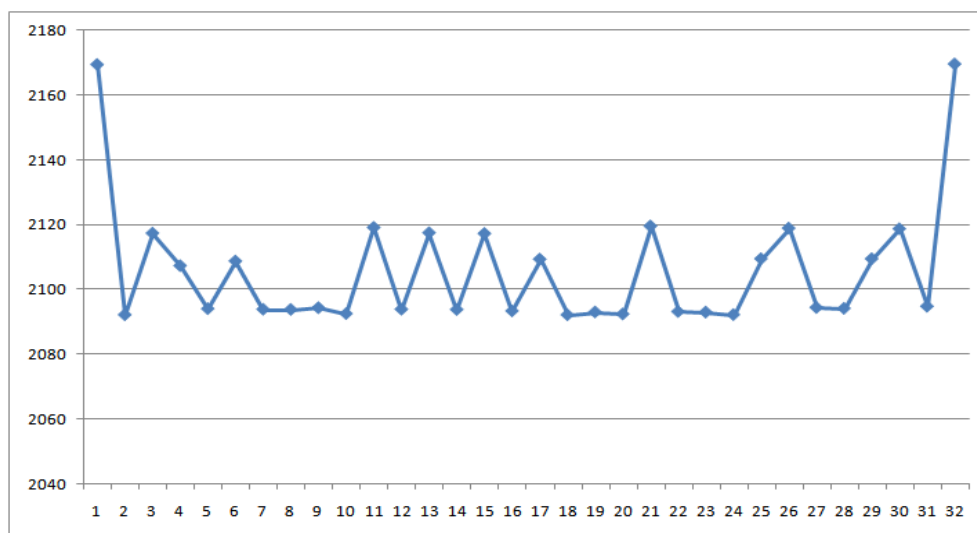
Πίνακας 5.6.6

Στη συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα του χρόνου ολοκλήρωσης επιθεώρησης με ομογενοποιημένες ταχύτητες για όλες τις ομάδες ανά αύξοντα αριθμό επανάληψης.



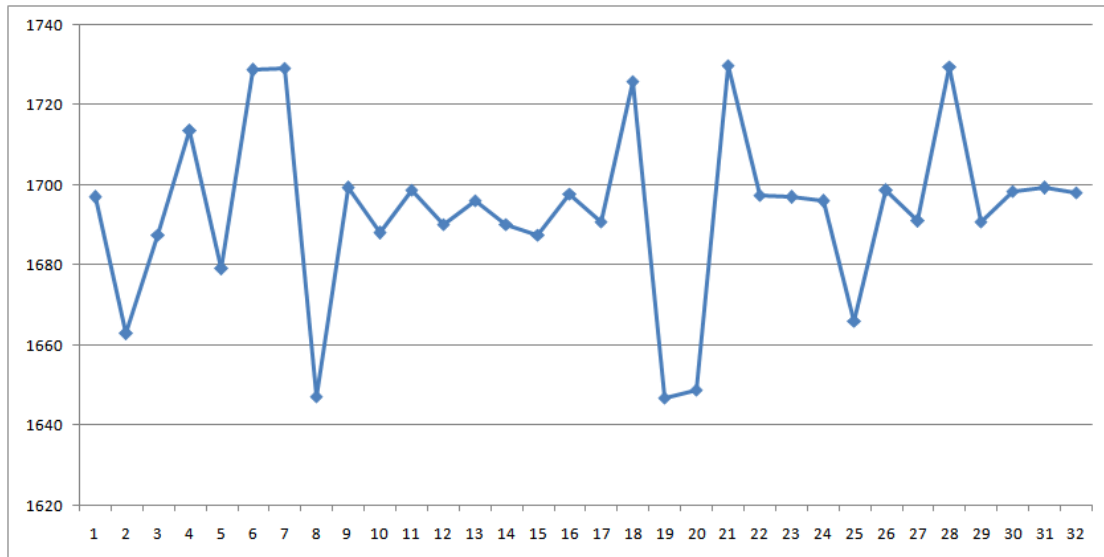
Διάγραμμα Χρόνου Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης ανά Επανάληψη για Ομάδα 2 Συνεργείων
 Άξονας Y : Χρόνος σε Ώρες
 Άξονας X : Αριθμός Επανάληψης

Πίνακας 5.6.7



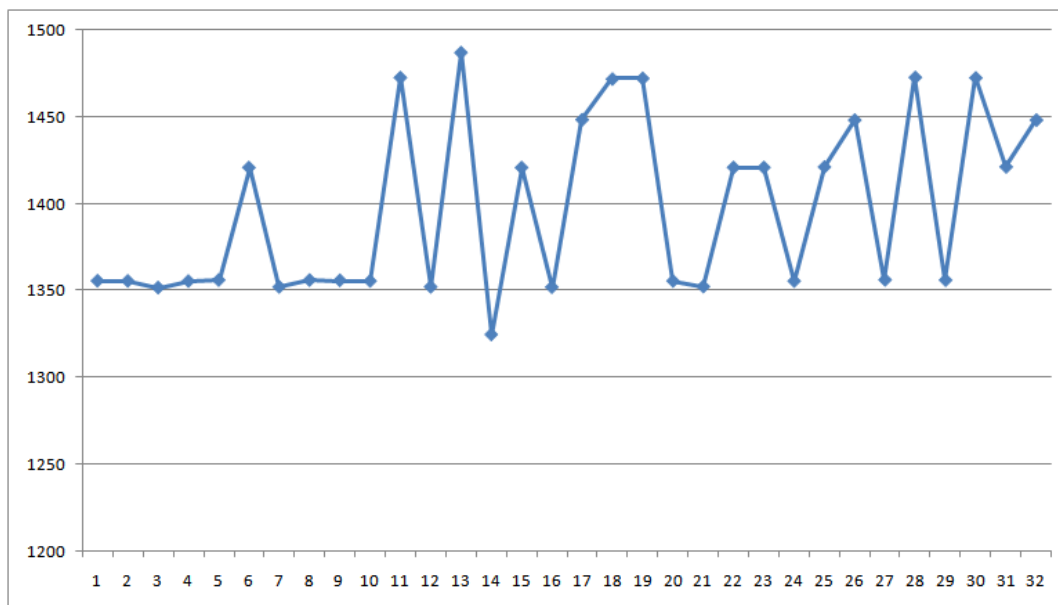
Διάγραμμα Χρόνου Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης ανά Επανάληψη για Ομάδα 3ων Συνεργείων
 Άξονας Y : Χρόνος σε Ώρες
 Άξονας X : Αριθμός Επανάληψης

Πίνακας 5.6.8



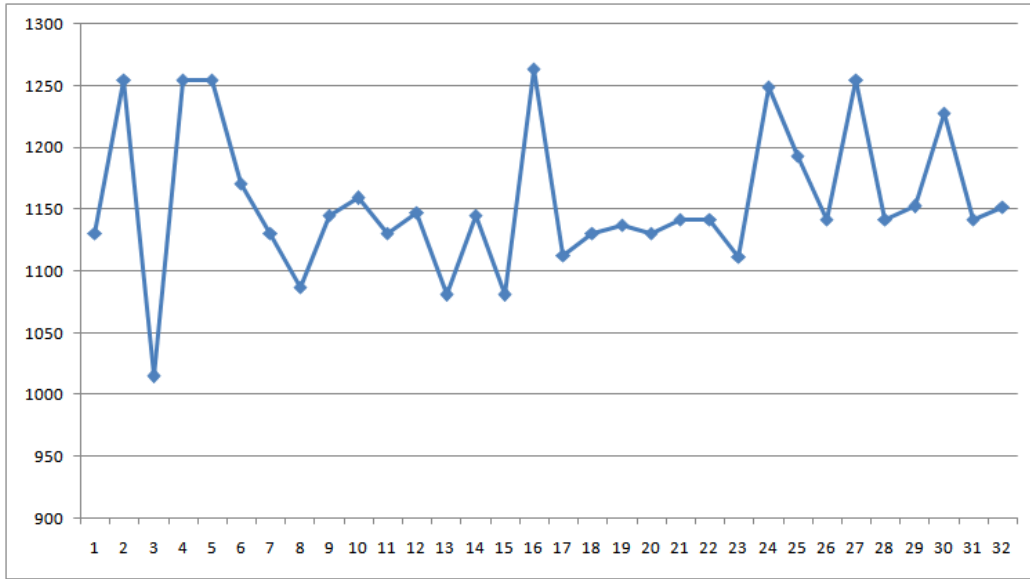
Διάγραμμα Χρόνου Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης ανά Επανάληψη για Ομάδα 4ων Συνεργείων
 Άξονας Y : Χρόνος σε Ώρες
 Άξονας X : Αριθμός Επανάληψης

Πίνακας 5.6.9



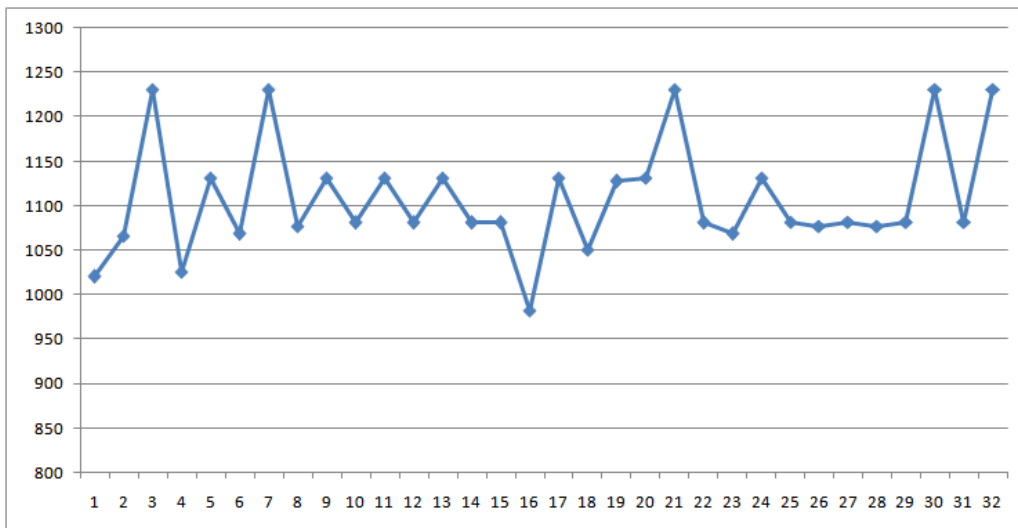
Διάγραμμα Χρόνου Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης ανά Επανάληψη για Ομάδα 5 Συνεργείων
 Άξονας Y : Χρόνος σε Ώρες
 Άξονας X : Αριθμός Επανάληψης

Πίνακας 5.6.10



Διάγραμμα Χρόνου Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης ανά Επανάληψη για Ομάδα 6 Συνεργείων
 Άξονας Y : Χρόνος σε Ώρες
 Άξονας X : Αριθμός Επανάληψης

Πίνακας 5.6.11



Διάγραμμα Χρόνου Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης ανά Επανάληψη για Ομάδα 7 Συνεργείων
 Άξονας Y : Χρόνος σε Ώρες
 Άξονας X : Αριθμός Επανάληψης

Πίνακας 5.6.12

Ακολουθεί ένας πίνακας στον οποίο φαίνονται οι αρχικές θέσεις συνεργείων και η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που προέκυψαν ενδεικτικά για τις επιλύσεις για σενάριο ομάδας 5 συνεργείων.

Επανάληψη	Αρχικές Θέσεις Συνεργείων	Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης
1	8 - 39 - 82 - 92 - 107	5636,142
2	9 - 39 - 82 - 92 - 107	6326,393
3	8 - 39 - 82 - 91 - 108	5361,597
4	9 - 39 - 82 - 92 - 107	5027,019
5	8 - 39 - 82 - 92 - 107	6223,232
6	8 - 39 - 68 - 98 - 107	7040,201
7	8 - 39 - 82 - 91 - 108	5124,302
8	9 - 38 - 82 - 92 - 107	6909,145
9	9 - 39 - 82 - 92 - 107	6778,812
10	9 - 39 - 82 - 92 - 107	7466,419
11	5 - 41 - 68 - 96 - 106	6874,394
12	5 - 37 - 82 - 91 - 108	6379,445
13	8 - 32 - 68 - 97 - 102	7150,322
14	8 - 39 - 82 - 90 - 108	5701,929
15	8 - 37 - 68 - 98 - 107	6266,956
16	5 - 37 - 82 - 90 - 108	6047,164
17	5 - 38 - 68 - 98 - 108	6149,82
18	8 - 38 - 68 - 97 - 105	5854,287
19	9 - 43 - 71 - 98 - 107	6665,784
20	8 - 39 - 82 - 92 - 107	5730,389
21	5 - 38 - 82 - 91 - 108	6015,959
22	5 - 37 - 68 - 98 - 107	6565,163
23	9 - 37 - 68 - 98 - 107	5506,108
24	9 - 39 - 82 - 92 - 107	6441,406
25	5 - 38 - 68 - 98 - 107	5970,224
26	9 - 37 - 68 - 98 - 108	6715,464
27	9 - 39 - 82 - 92 - 107	5390,601
28	5 - 37 - 68 - 96 - 105	6541,303
29	8 - 39 - 82 - 92 - 107	5828,637
30	8 - 39 - 68 - 96 - 105	5922,783
31	8 - 38 - 68 - 98 - 107	6110,454
32	8 - 38 - 68 - 98 - 108	6456,061

Πίνακας 5.7

Στον παραπάνω πίνακα είναι προφανές πως παρά το μεγάλο εύρος τυχαίων παραμέτρων, τα αποτελέσματα συγκλίνουν ικανοποιητικά (χωρίς ομογενοποίηση ταχυτήτων).

Για να εντοπίσουμε την καλύτερη και την χειρότερη ‘ποιοτικά’ λύση, θα υπολογίσουμε για κάθε επανάληψη και ομάδα το ποσοστό υπέρβασης του χρόνου ολοκλήρωσης επιθεώρησης από τον ελάχιστο χρόνο που έχει προκύψει από τις 32 επιλύσεις. Ακολουθώντας, θα προσθέσουμε τα τετράγωνα των ποσοστών αυτών ανά επανάληψη τόσο για όλες τις ομάδες (2 - 7) όσο και για τις ομάδες 4 - 7. Οι μικρότερη τιμή υπέρβασης που προκύπτει δίνει την καλύτερη ‘ποιοτικά’ λύση ενώ μεγαλύτερη δίνει τη χειρότερη.

Ακολουθεί πίνακας με τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής:

Ποσοστά Υπέρβασης Ελάχιστου Χρόνου ανά Ομάδα ανά Επίλυση								
Επι/ληψη	2 Συν.	3 Συν.	4 Συν.	5 Συν.	6 Συν.	7 Συν.	$\Sigma(\Delta t^2)$ για 4-7 Συν.	$\Sigma(\Delta t^2)$ για 2-7 Συν.
1	0,040	3,691	3,044	2,341	11,381	3,931	159,721	173,346
2	0,007	0,001	0,981	2,332	23,575	8,573	635,687	635,687
3	0,006	1,204	2,477	2,042	0,000	25,360	653,408	654,859
4	0,003	0,725	4,048	2,326	23,575	4,487	597,726	598,251
5	0,105	0,090	1,963	2,371	23,594	15,248	798,661	798,680
6	0,077	0,792	4,977	7,270	15,322	8,826	390,286	390,920
7	0,087	0,082	5,002	2,074	11,381	25,374	802,695	802,710
8	0,095	0,079	0,029	2,370	7,095	9,708	150,202	150,217
9	0,590	0,104	3,187	2,359	12,839	15,250	413,147	413,506
10	0,023	0,018	2,504	2,332	14,209	10,079	315,209	315,210
11	0,093	1,288	3,161	11,185	11,381	15,246	497,065	498,733
12	0,094	0,082	2,641	2,076	13,013	10,103	282,681	282,697
13	0,018	1,210	3,002	12,273	6,497	15,212	433,250	434,714
14	0,086	0,079	2,640	0,000	12,841	10,101	273,889	273,903
15	0,011	1,199	2,477	7,269	6,495	10,076	202,683	204,121
16	0,064	0,057	3,092	2,063	24,454	0,000	611,824	611,831
17	0,089	0,821	2,671	9,356	9,600	15,250	419,389	420,070
18	0,000	0,000	4,801	11,122	11,381	7,015	325,499	325,499
19	0,046	0,042	0,000	11,152	12,070	14,832	490,037	490,041
20	0,010	0,012	0,127	2,330	11,381	15,210	366,326	366,326
21	0,115	1,309	5,041	2,091	12,487	25,382	829,945	831,672
22	0,060	0,048	3,075	7,272	12,465	10,088	319,482	319,488
23	0,045	0,040	3,046	7,273	9,519	8,828	230,722	230,726
24	0,007	0,003	2,989	2,327	23,040	15,207	776,451	776,451
25	0,106	0,827	1,175	7,296	17,559	10,118	465,303	465,997
26	0,090	1,278	3,146	9,337	12,472	9,704	346,805	348,446
27	0,115	0,108	2,687	2,381	23,603	10,121	672,427	672,452
28	0,104	0,095	5,026	11,192	12,485	9,723	400,933	400,953
29	0,105	0,826	2,675	2,367	13,520	10,110	297,775	298,469
30	0,083	1,269	3,132	11,173	20,971	25,368	1217,977	1219,595
31	0,126	0,125	3,187	7,299	12,498	10,133	322,316	322,347
32	0,069	3,699	3,113	9,3356	13,503	25,36	922,540	936,223

Πίνακας 5.8

Καλύτερη ποιοτικά λύση είναι της 8^η επανάληψης και χειρότερη της 30^{ης}.

Μελετώντας τα αποτελέσματα των 32 επίλυσεων, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για την επιρροή των παραμέτρων στην ποιότητα του αποτελέσματος. Συνεπώς, συνδυάζοντας τις παραμέτρους Harmony της 8^{ης} επίλυσης με τις παραμέτρους Ant Colony της 4^{ης} επίλυσης, πραγματοποιούμε μία ακόμα επίλυση. Ως ταχύτητες επιθεώρησης και κίνησης, χρησιμοποιούμε τις αντίστοιχες μέσες ταχύτητες.

Τα αποτελέσματα της επίλυσης αυτής καθώς και της χειρότερης θα παρουσιαστούν και με πιο παραστατικό τρόπο επάνω στο ψηφιακό υπόβαθρο της πόλης της Πάτρας. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να φανεί και ο τρόπος που το πρότυπο διαμερίζει την πόλη και δρομολογεί τα συνεργεία.

Αποτελέσματα ‘καλύτερης’ λύσης

Παράμετροι Harmony Search		Παράμετροι Ant Colony	
HMS =	6	m =	63
HMCR =	0,200	A =	0,910
Par =	0,400	B =	0,970
Επαναλήψεις:	200000	R =	0,210
		Q =	0,306
		Επαναλήψεις:	400
Ταχύτητα Κίνησης Συνεργείων=		10000	m/hour
Ταχύτητα Επιθεώρησης =		50,000	m ² /min

Επίλυση Με Ομάδα 2 Συνεργείων

Διαδρομή 1 ^{ου} Συνεργείου:	40 , 38 , 37 , 39 , 44 , 22 , 34 , 33 , 32 , 25 , 31 , 26 , 27 , 19 , 17 , 15 , 16 , 18 , 14 , 7 , 9 , 8 , 6 , 5 , 3 , 4 , 2 , 1 , 10 , 11 , 12 , 13 , 21 , 20 , 112 , 28 , 29 , 35 , 36 , 30 , 48 , 49 , 50 , 51 , 52 , 53 , 54 , 55 , 56 , 57 , 61 , 62 , 73 , 74 , 76 , 94 , 93 , 95 , 109 , 111 , 110 , 108 , 45 , 46 , 47 , 41 , 43 , 42 , 23 , 24
--------------------------------------	---

Διαδρομή 2 ^{ου} Συνεργείου:	66 , 63 , 64 , 67 , 65 , 68 , 69 , 58 , 59 , 60 , 72 , 75 , 79 , 84 , 85 , 100 , 90 , 78 , 77 , 91 , 92 , 98 , 96 , 97 , 99 , 107 , 106 , 102 , 101 , 103 , 105 , 104 , 89 , 87 , 86 , 80 , 81 , 82 , 88 , 83 , 71 , 70
--------------------------------------	---

Επίλυση Με Ομάδα 3ων Συνεργείων

Διαδρομή 1 ^{ου} Συνεργείου:	50 , 51 , 52 , 53 , 54 , 55 , 56 , 45 , 46 , 47 , 35 , 36 , 37 , 39 , 41 , 40 , 38 , 31 , 30 , 29 , 28 , 27 , 26 , 25 , 24 , 33 , 23 , 21 , 20 , 19 , 112 , 18 , 17 , 15 , 16 , 12 , 11 , 10 , 9 , 8 , 5 , 4 , 3 , 2 , 1 , 6 , 7 , 13 , 14 , 76 , 22 , 42 , 43 , 44,34 , 32 , 49 , 48
Διαδρομή 2 ^{ου} Συνεργείου:	68 , 65 , 84 , 85 , 88 , 83 , 71 , 70 , 79 , 75 , 72 , 69 , 58 , 59 , 60 , 61 , 62 , 64 , 66 , 63 , 80 , 81 , 82 , 87 , 86 , 89 , 104 , 103 , 102 , 100 , 90 , 78 , 91 , 92 , 77 , 74 , 73 , 57 , 67

Διαδρομή 3 ^{ου} Συνεργείου:	110 , 108 , 106 , 105 , 101 , 98 , 94 , 93 , 95 , 96 , 97 , 99 107 , 109 , 111
--------------------------------------	---

Επίλυση Με Ομάδα 4ων Συνεργείων

Διαδρομή 1 ^{ου} Συνεργείου:	3 , 5 , 6 , 8 , 7 , 13 , 14 , 12 , 11 , 10 , 9 , 4 , 2 , 1
--------------------------------------	--

Διαδρομή 2 ^{ου} Συνεργείου:	93 , 95 , 96 , 98 , 78 , 91 , 92 , 77 , 76 , 74 , 73 , 45 , 57 , 56 , 55 , 54 , 53 , 52 , 51 , 50 , 49 , 41 , 43 , 44 , 46 , 48 , 47 , 39 , 37 , 36 , 35 , 29 , 28 , 112 , 19 , 18 , 17 , 15 , 16 , 21 , 20 , 26 , 27 , 30 , 31 , 38 , 32 , 25 , 24 , 23 , 34 , 40 , 42 , 33 , 22 , 94
--------------------------------------	--

Διαδρομή 3 ^{ου} Συνεργείου:	90 , 79 , 75 , 72 , 69 , 58 , 59 , 60 , 61 , 62 , 70 , 71 , 67 , 64 , 65 , 68 , 66 , 63 , 80 , 81 , 82 , 87 , 86 , 89 , 104 , 103 88 , 83 , 84 , 85 , 100
--------------------------------------	---

Διαδρομή 4 ^{ου} Συνεργείου:	105 , 106 , 108 , 110 , 111 , 109 , 107 , 99 , 97 , 101 , 102
--------------------------------------	--

Επίλυση Με Ομάδα 5 Συνεργείων

Διαδρομή 1 ^{ου} Συνεργείου:	2 , 1 , 4 , 9 , 10 , 11 , 12 , 13 , 7 , 8 , 6 , 5 , 3
--------------------------------------	---

Διαδρομή 2 ^{ου} Συνεργείου:	72 , 69 , 58 , 59 , 60 , 61 , 62 , 52 , 53 , 54 , 55 , 56 , 57 , 47 , 48 , 49 , 50 , 51 , 35 , 36 , 37 , 39 , 31 , 30 , 29 , 28 , 112 , 18 , 17 , 15 , 16 , 14 , 21 , 20 , 19 , 27 , 26 , 25 , 24 , 23 , 34 , 33 , 32 , 38 , 40 , 42 , 22 , 44 , 41 , 43 , 46 , 45 , 73
--------------------------------------	---

Διαδρομή 3 ^{ου} Συνεργείου:	88 , 83 , 71 , 70 , 67 , 64 , 65 , 68 , 66 , 63 , 80 , 81 , 82 , 87 , 86 , 89 , 104 , 103 , 84
--------------------------------------	---

Διαδρομή 4 ^{ου} Συνεργείου:	92 , 91 , 78 , 77 , 76 , 74 , 75 , 79 , 85 , 100 , 90 , 98 , 97 , 96 , 95 , 93 , 94
--------------------------------------	--

Διαδρομή 5 ^{ου} Συνεργείου:	101 , 102 , 105 , 106 , 108 , 110 , 111 , 109 , 99 , 107
--------------------------------------	--

Επίλυση Με Ομάδα 6 Συνεργείων

Διαδρομή 1 ^{ου} Συνεργείου:	2, 1, 4, 9, 10, 7, 8, 6, 5, 3
Διαδρομή 2 ^{ου} Συνεργείου:	18, 17, 15, 14, 13, 12, 11, 16, 21, 20, 19, 112, 28, 29, 30, 31, 32, 38, 40, 43, 41, 42, 22, 44, 45, 73, 57, 56, 55, 54, 53, 52, 51, 50, 49, 48, 47, 46, 39, 37, 36, 35, 26, 25, 24, 23, 34, 33, 27
Διαδρομή 3 ^{ου} Συνεργείου:	61, 67, 64, 65, 68, 66, 63, 80, 81, 82, 87, 86, 89, 88, 83, 71, 70, 72, 69, 58, 59, 60, 62
Διαδρομή 4 ^{ου} Συνεργείου:	92, 91, 78, 77, 76, 74, 75, 79, 84, 85, 90, 98, 96, 95, 93, 94
Διαδρομή 5 ^{ου} Συνεργείου:	102, 103, 104, 105, 106, 101, 100
Διαδρομή 6 ^{ου} Συνεργείου:	97, 107, 108, 110, 111, 109, 99

Επίλυση Με Ομάδα 7 Συνεργείων

Διαδρομή 1 ^{ου} Συνεργείου:	5, 3, 2, 1, 4, 10, 9, 8, 6
Διαδρομή 2 ^{ου} Συνεργείου:	33, 32, 31, 30, 29, 28, 112, 18, 17, 15, 14, 13, 7, 11, 12, 16, 21, 20, 19, 27, 26, 25, 24, 23
Διαδρομή 3 ^{ου} Συνεργείου:	38, 40, 42, 34, 22, 44, 43, 41, 39, 37, 36, 35, 51, 50, 49, 48, 47, 46, 45, 73, 72, 74, 76, 77, 78, 75, 70, 69, 58, 59, 60, 61, 62, 52, 53, 54, 55, 56, 57
Διαδρομή 4 ^{ου} Συνεργείου:	67, 64, 65, 68, 66, 63, 80, 81, 82, 87, 86, 89, 88, 85, 84, 79, 83, 71
Διαδρομή 5 ^{ου} Συνεργείου:	90, 91, 92, 94, 93, 96, 95, 99, 97, 98
Διαδρομή 6 ^{ου} Συνεργείου:	102, 103, 104, 105, 106, 101, 100
Διαδρομή 7 ^{ου} Συνεργείου:	107, 108, 110, 111, 109

Χρόνοι Ομάδας 2 Συνεργείων	
Χρόνος Ταξιδιού 1ου Συνεργείου	3,444 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 1ου Συνεργείου	2825,383 ώρες
Συνολικός Χρόνος 1ου Συνεργείου	2828,827 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 2ου Συνεργείου	
Χρόνος Ταξιδιού 2ου Συνεργείου	1,703 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 2ου Συνεργείου	3361,176 ώρες
Συνολικός Χρόνος 2ου Συνεργείου	3362,879 ώρες

Χρόνος Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης	3362,879 ώρες
Συνολικές Μέρες με 2 8ωρες Βάρδιες	210,180 μέρες

Χρόνοι Ομάδας 3 ^{ωv} Συνεργείων	
Χρόνος Ταξιδιού 1 ^{ου} Συνεργείου	2,166 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 1ου Συνεργείου	2002,988 ώρες
Συνολικός Χρόνος 1ου Συνεργείου	2005,153 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 2 ^{ου} Συνεργείου	1,234 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 2ου Συνεργείου	2115,975 ώρες
Συνολικός Χρόνος 2ου Συνεργείου	2117,208 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 3 ^{ου} Συνεργείου	1,121 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 3ου Συνεργείου	2067,597 ώρες
Συνολικός Χρόνος 3ου Συνεργείου	2068,717 ώρες

Χρόνος Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης	2117,208 ώρες
Συνολικές Μέρες με 2 8ωρες Βάρδιες	132,326 μέρες

Χρόνοι Ομάδας 4 ^{ωv} Συνεργείων	
Χρόνος Ταξιδιού 1 ^{ου} Συνεργείου	1,488 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 1ου Συνεργείου	1347,205 ώρες
Συνολικός Χρόνος 1ου Συνεργείου	1348,694 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 2 ^{ου} Συνεργείου	1,166 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 2ου Συνεργείου	1545,496 ώρες
Συνολικός Χρόνος 2ου Συνεργείου	1546,662 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 3 ^{ου} Συνεργείου	0,831 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 3ου Συνεργείου	1647,948 ώρες
Συνολικός Χρόνος 3ου Συνεργείου	1648,779 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 4 ^{ου} Συνεργείου	1,104 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 4ου Συνεργείου	1645,911 ώρες
Συνολικός Χρόνος 4ου Συνεργείου	1647,015 ώρες

Χρόνος Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης	1648,779 ώρες
Συνολικές Μέρες με 2 8ωρες Βάρδιες	103,049 μέρες

Χρόνοι Ομάδας 5 Συνεργείων	
Χρόνος Ταξιδιού 1ου Συνεργείου	1,346 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 1ου Συνεργείου	1244,238 ώρες
Συνολικός Χρόνος 1ου Συνεργείου	1245,584 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 2ου Συνεργείου	0,710 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 2ου Συνεργείου	982,322 ώρες
Συνολικός Χρόνος 2ου Συνεργείου	983,032 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 3ου Συνεργείου	0,719 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 3ου Συνεργείου	1325,708 ώρες
Συνολικός Χρόνος 3ου Συνεργείου	1326,428 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 4ου Συνεργείου	0,614 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 4ου Συνεργείου	1346,930 ώρες
Συνολικός Χρόνος 4ου Συνεργείου	1347,545 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 5ου Συνεργείου	0,832 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 5ου Συνεργείου	1287,360 ώρες
Συνολικός Χρόνος 5ου Συνεργείου	1288,192 ώρες

Χρόνος Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης	1347,545 ώρες
Συνολικές Μέρες με 2 8ωρες Βάρδιες	84,222 μέρες

Χρόνοι Ομάδας 6 Συνεργείων	
Χρόνος Ταξιδιού 1ου Συνεργείου	1,288 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 1ου Συνεργείου	1048,200 ώρες
Συνολικός Χρόνος 1ου Συνεργείου	1049,489 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 2ου Συνεργείου	0,809 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 2ου Συνεργείου	983,636 ώρες
Συνολικός Χρόνος 2ου Συνεργείου	984,445 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 3ου Συνεργείου	0,507 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 3ου Συνεργείου	1061,784 ώρες
Συνολικός Χρόνος 3ου Συνεργείου	1062,291 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 4ου Συνεργείου	0,583 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 4ου Συνεργείου	1202,395 ώρες
Συνολικός Χρόνος 4ου Συνεργείου	1202,978 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 5ου Συνεργείου	0,574	ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 5ου Συνεργείου	945,640	ώρες
Συνολικός Χρόνος 5ου Συνεργείου	946,214	ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 6ου Συνεργείου	0,678	ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 6ου Συνεργείου	944,904	ώρες
Συνολικός Χρόνος 6ου Συνεργείου	945,582	ώρες

Χρόνος Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης	1202,978	ώρες
Συνολικές Μέρες με 2 8ωρες Βάρδιες	75,186	μέρες

Χρόνοι Ομάδας 7 Συνεργείων		
Χρόνος Ταξιδιού 1ου Συνεργείου	1,167	ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 1ου Συνεργείου	670,286	ώρες
Συνολικός Χρόνος 1ου Συνεργείου	671,453	ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 2ου Συνεργείου	0,510	ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 2ου Συνεργείου	878,268	ώρες
Συνολικός Χρόνος 2ου Συνεργείου	878,778	ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 3ου Συνεργείου	0,603	ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 3ου Συνεργείου	962,020	ώρες
Συνολικός Χρόνος 3ου Συνεργείου	962,622	ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 4ου Συνεργείου	0,462	ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 4ου Συνεργείου	1080,397	ώρες
Συνολικός Χρόνος 4ου Συνεργείου	1080,859	ώρες

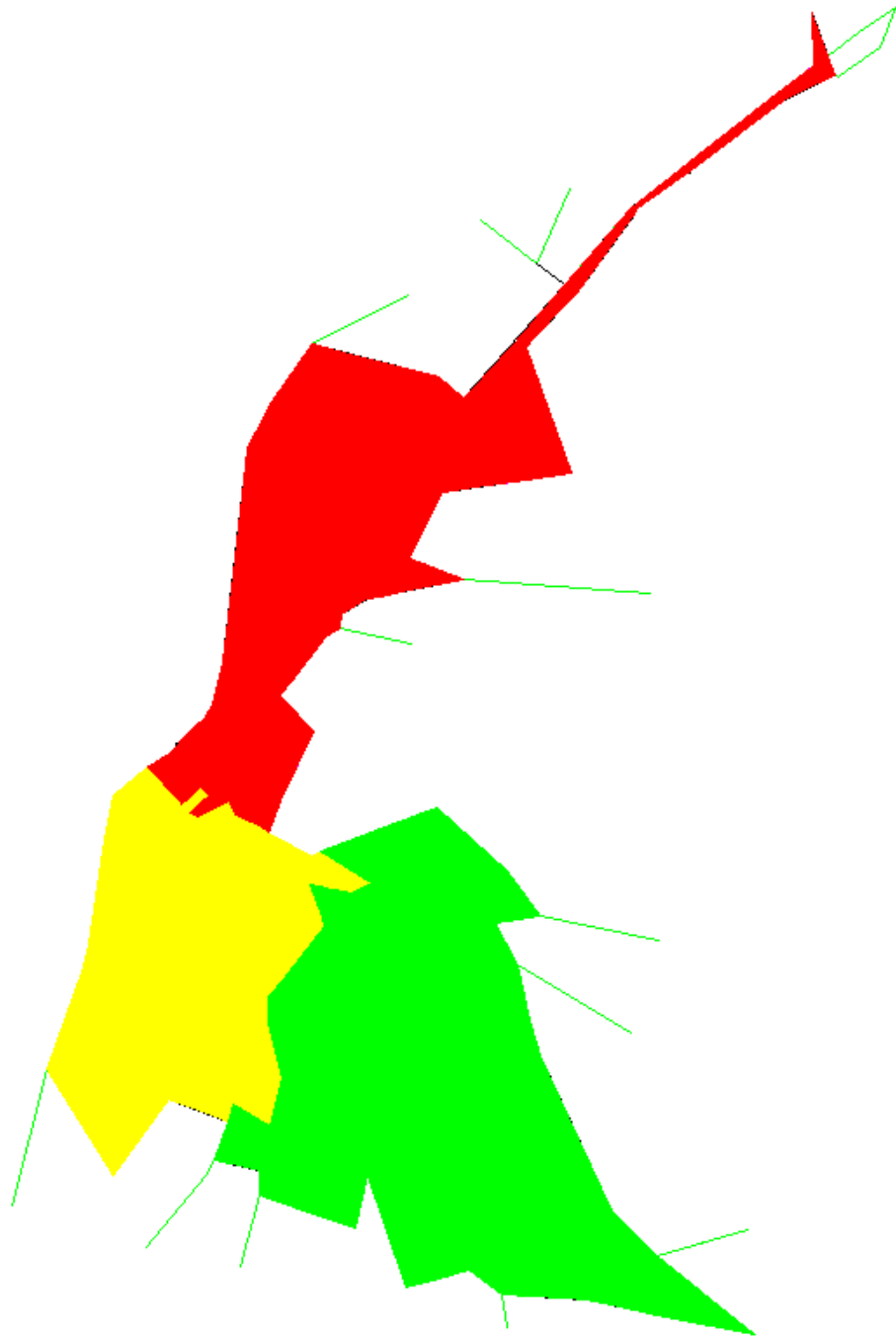
Χρόνος Ταξιδιού 5ου Συνεργείου	0,545	ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 5ου Συνεργείου	880,792	ώρες
Συνολικός Χρόνος 5ου Συνεργείου	881,337	ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 6ου Συνεργείου	0,574	ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 6ου Συνεργείου	945,640	ώρες
Συνολικός Χρόνος 6ου Συνεργείου	946,214	ώρες

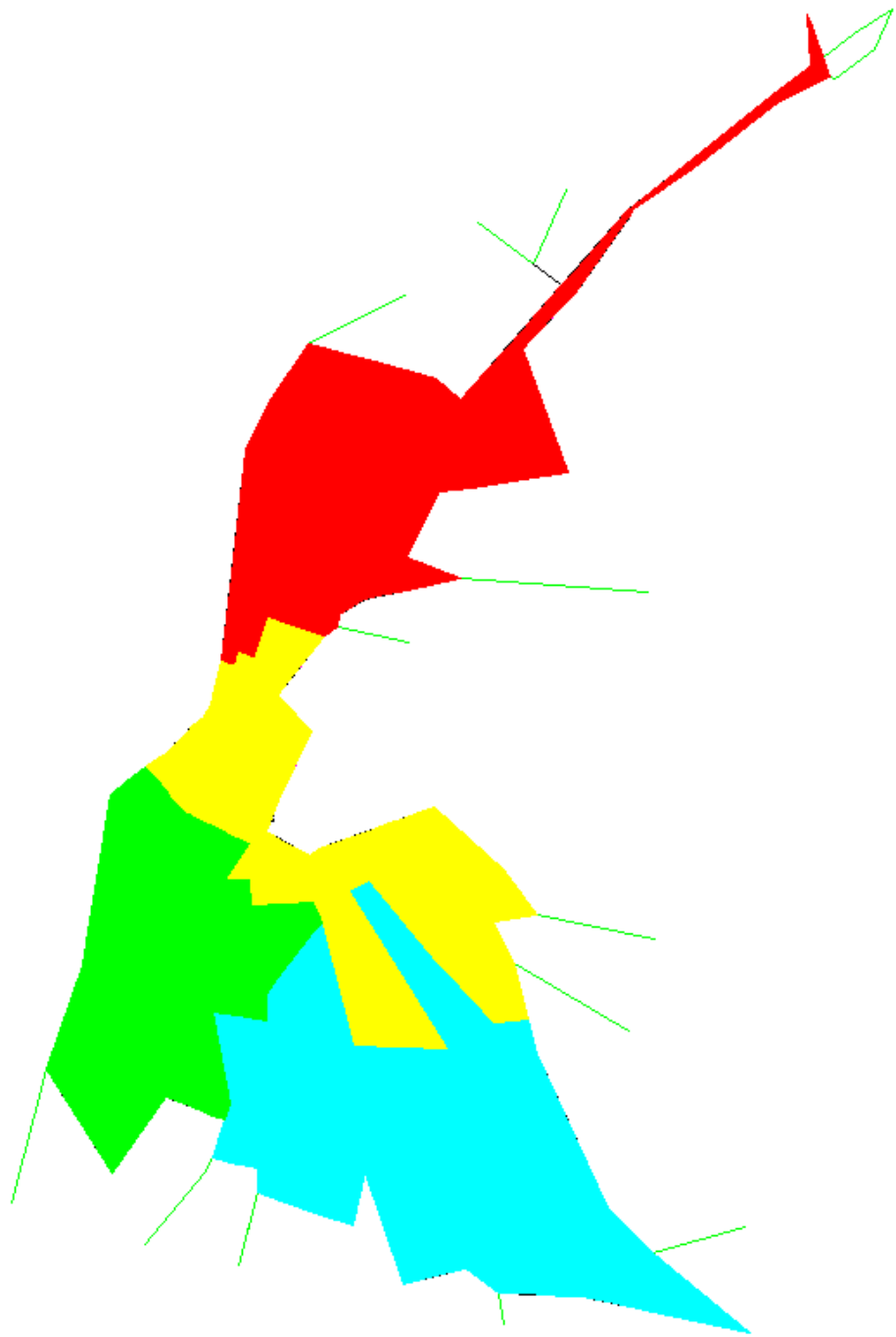
Χρόνος Ταξιδιού 7ου Συνεργείου	0,465	ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 7ου Συνεργείου	769,156	ώρες
Συνολικός Χρόνος 7ου Συνεργείου	769,621	ώρες

Χρόνος Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης	1080,859	ώρες
Συνολικές Μέρες με 2 8ωρες Βάρδιες	67,554	μέρες

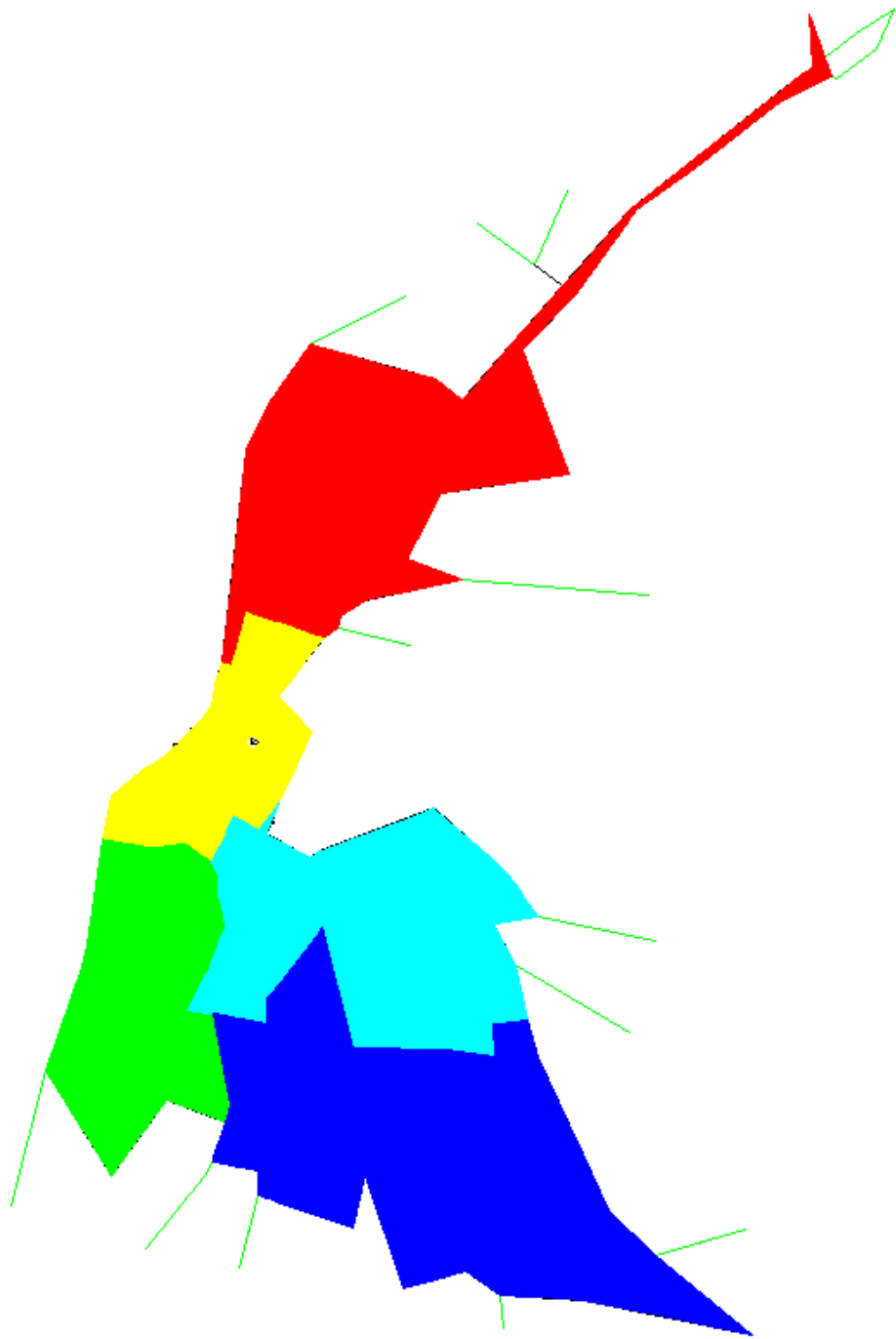
Σχέδιο Περιοχών Ευθύνης Ομάδας με 3 Μέλη - Βέλτιστο



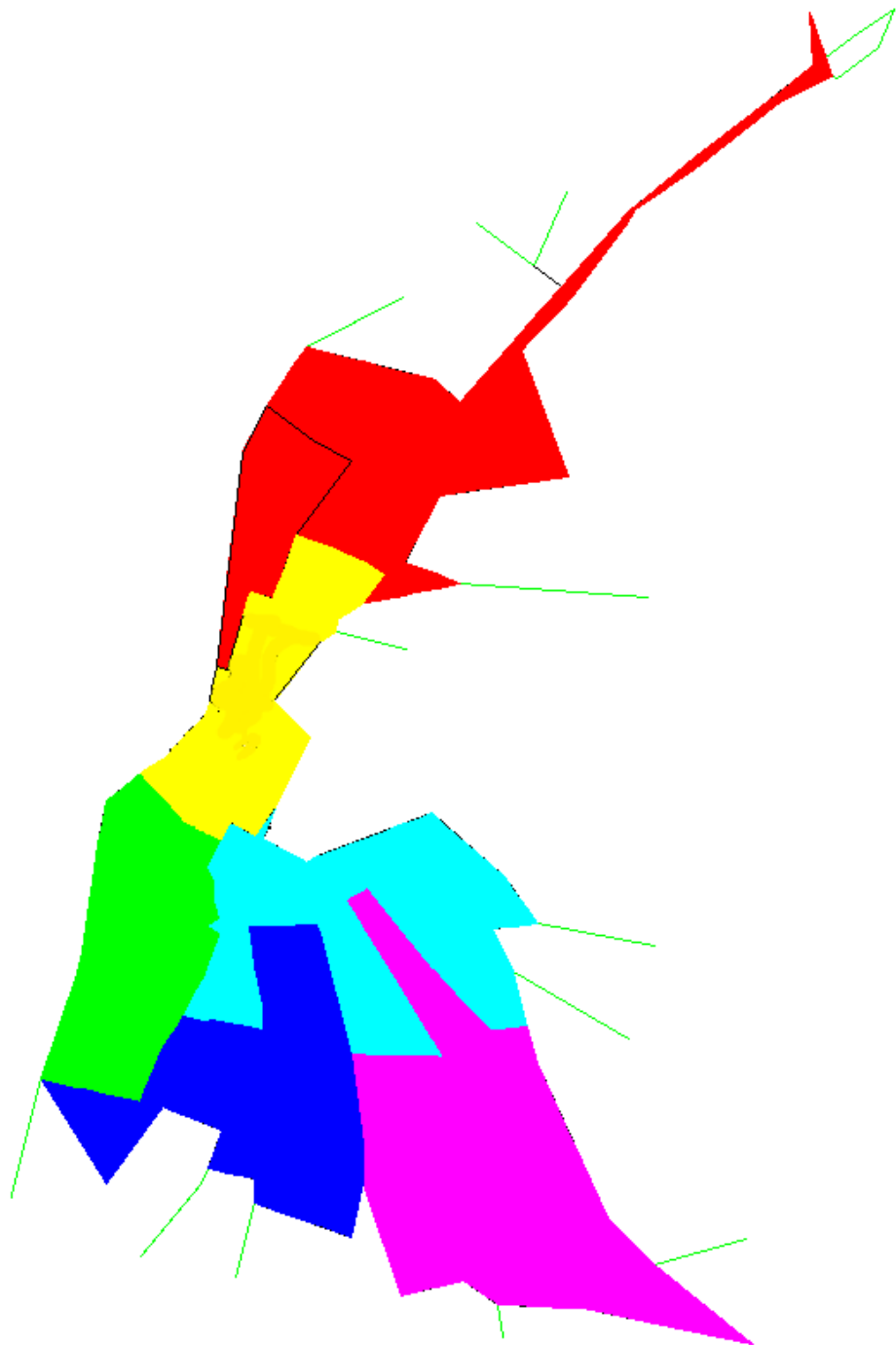
Σχέδιο Περιοχών Ευθύνης Ομάδας με 4 Μέλη - Βέλτιστο



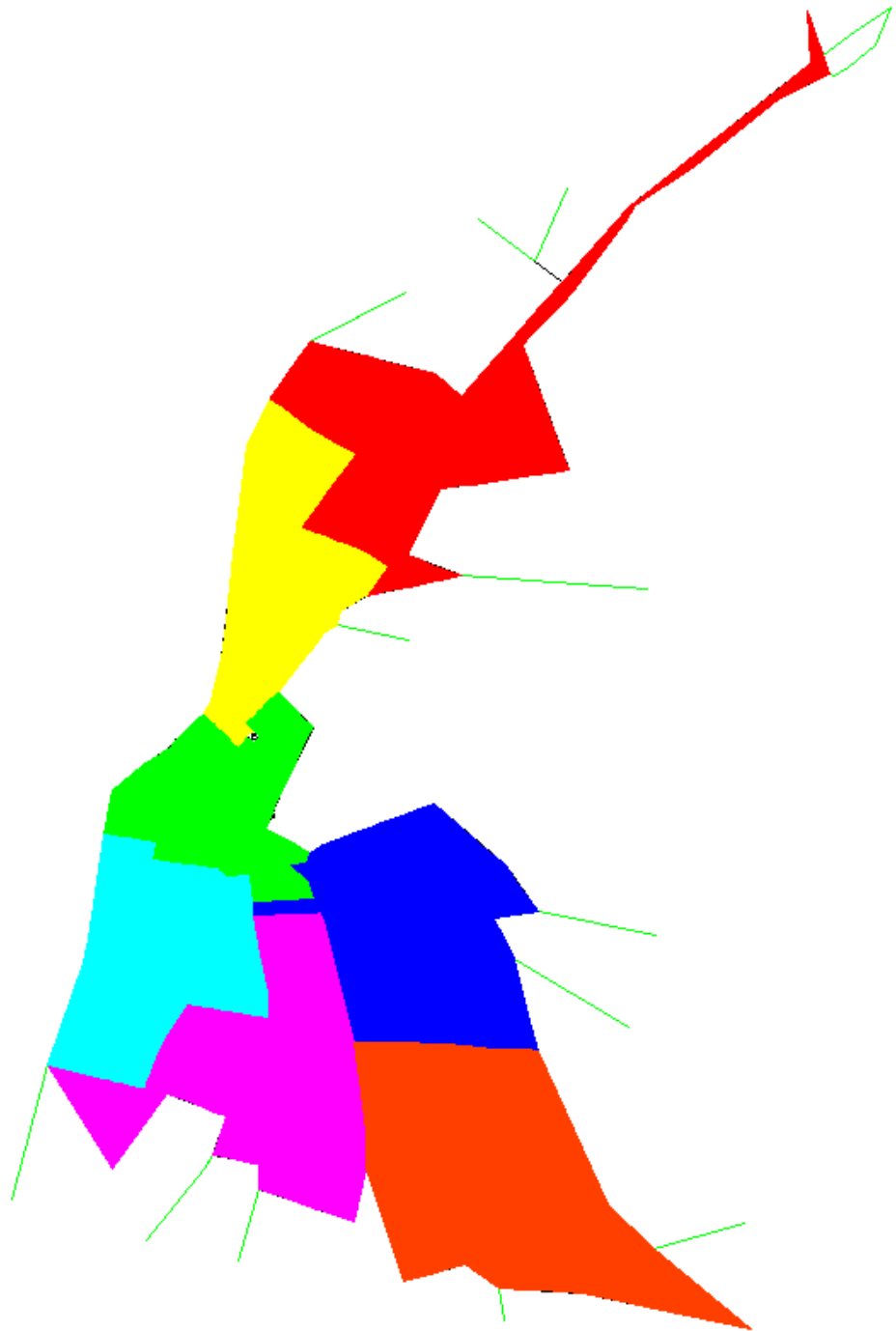
Σχέδιο Περιοχών Ευθύνης Ομάδας με 5 Μέλη - Βέλτιστο



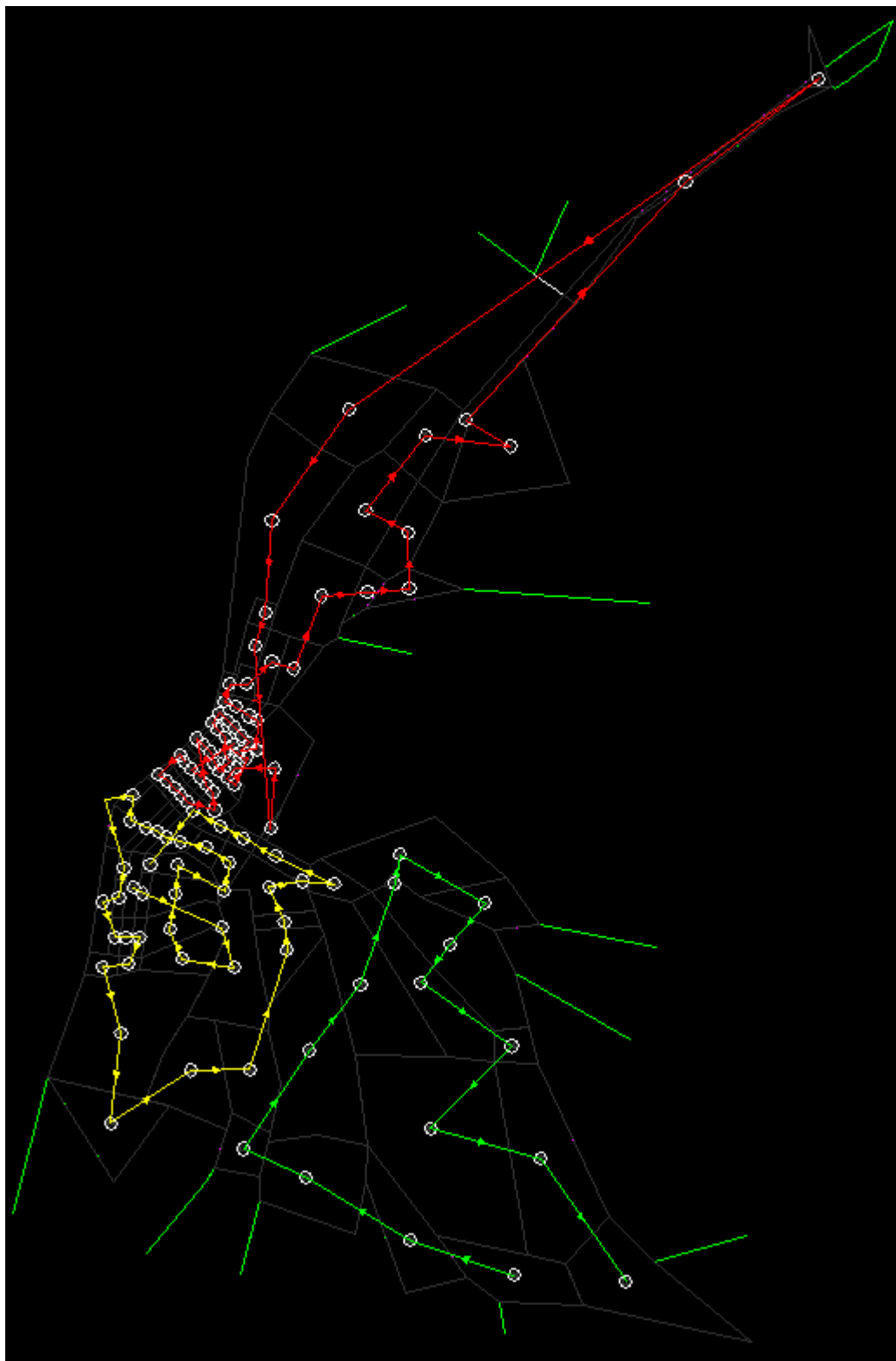
Σχέδιο Περιοχών Ευθύνης Ομάδας με 6 Μέλη - Βέλτιστο



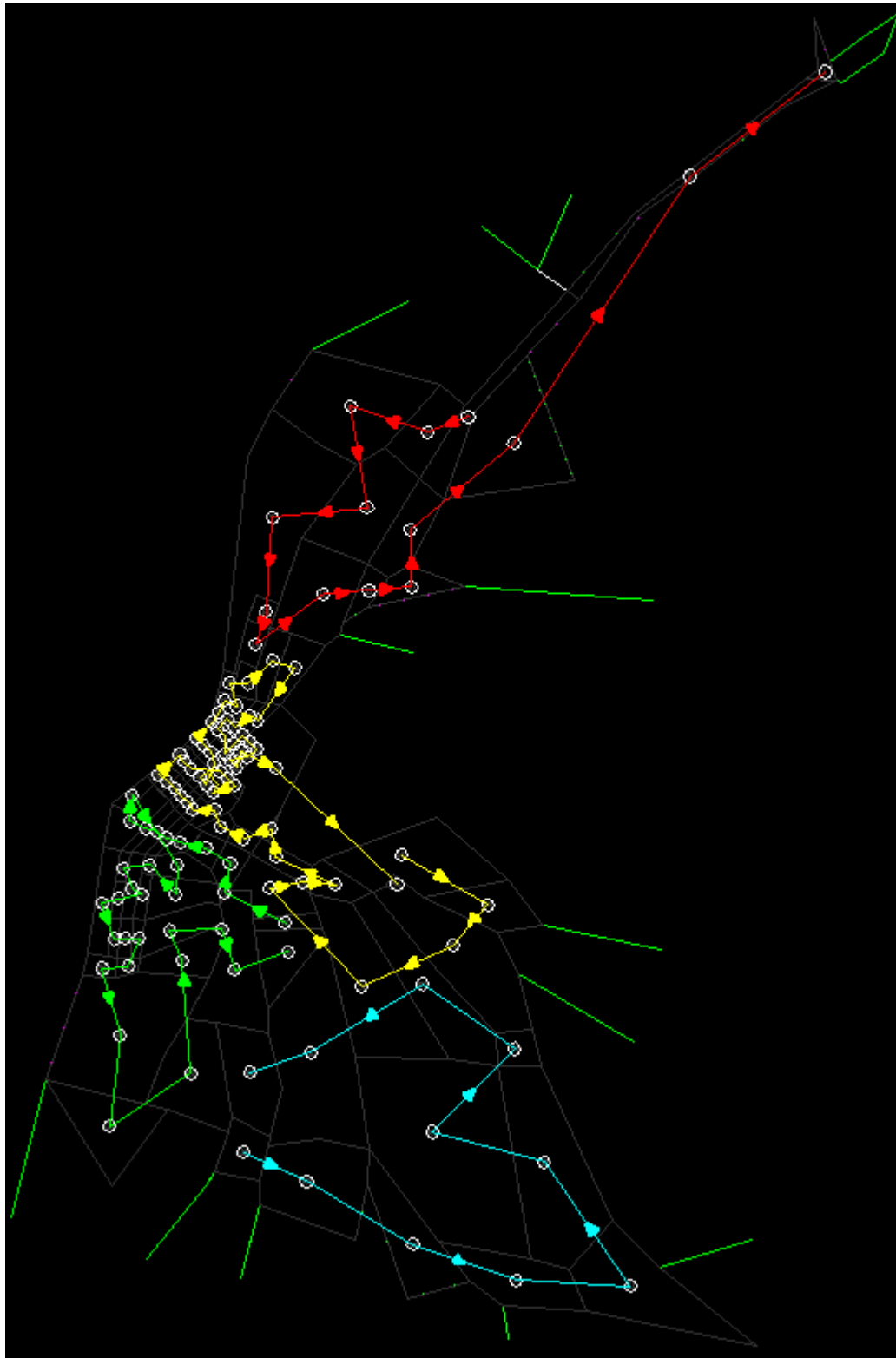
Σχέδιο Περιοχών Ευθύνης Ομάδας με 7 Μέλη - Βέλτιστο



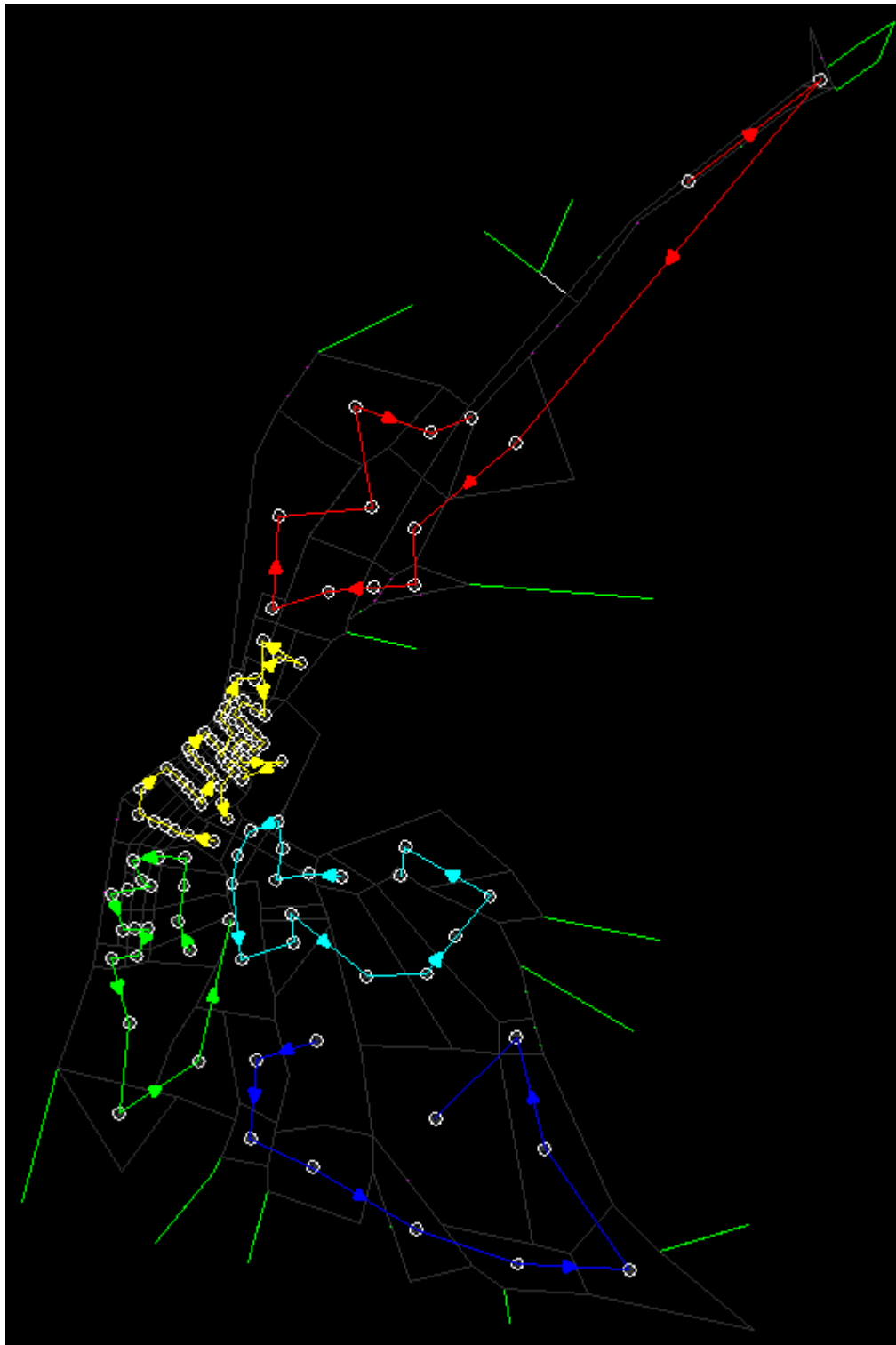
Σχέδιο Δρομολόγησης Ομάδας με 3 Μέλη - Βέλτιστο



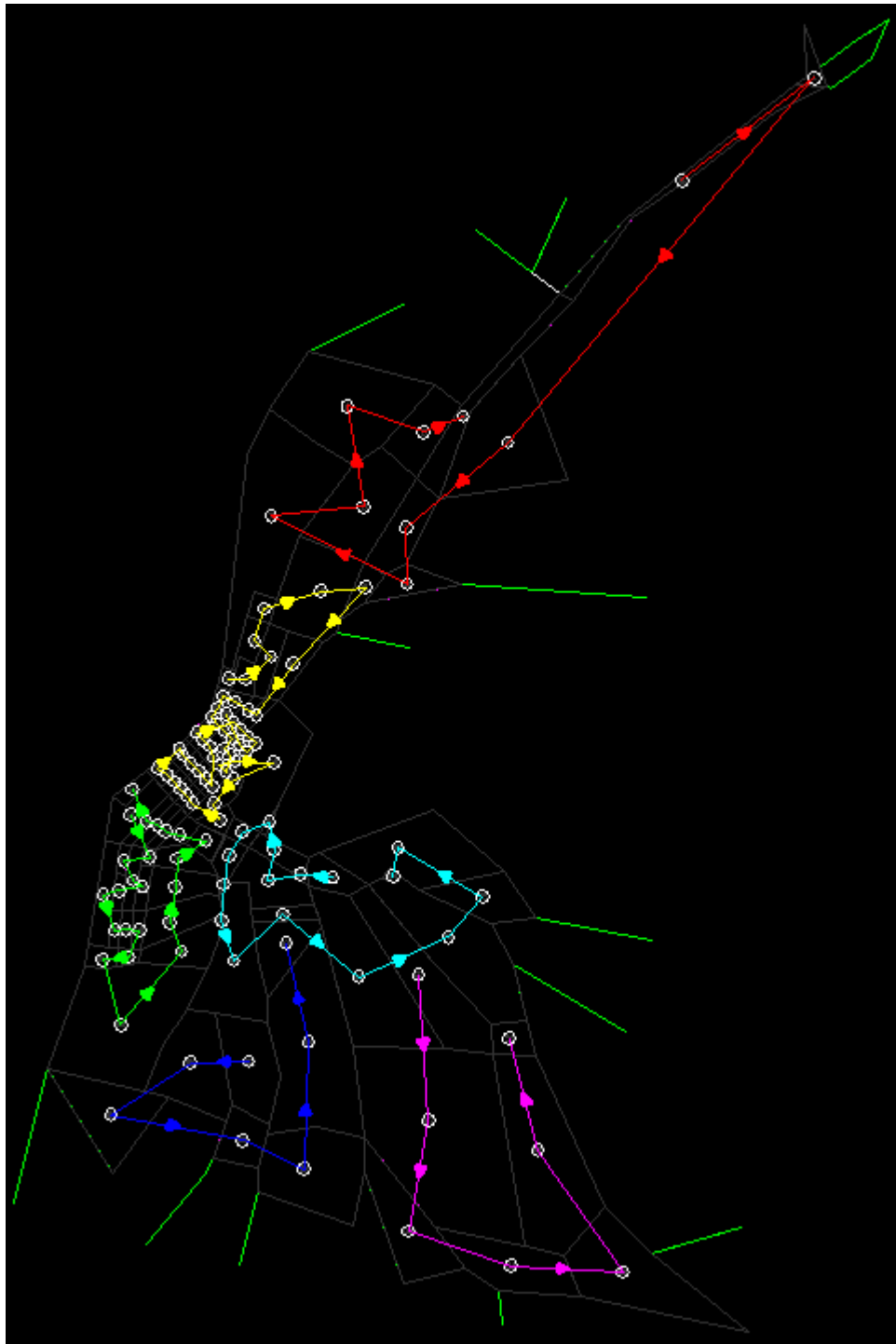
Σχέδιο Δρομολόγησης Ομάδας με 4 Μέλη - Βέλτιστο



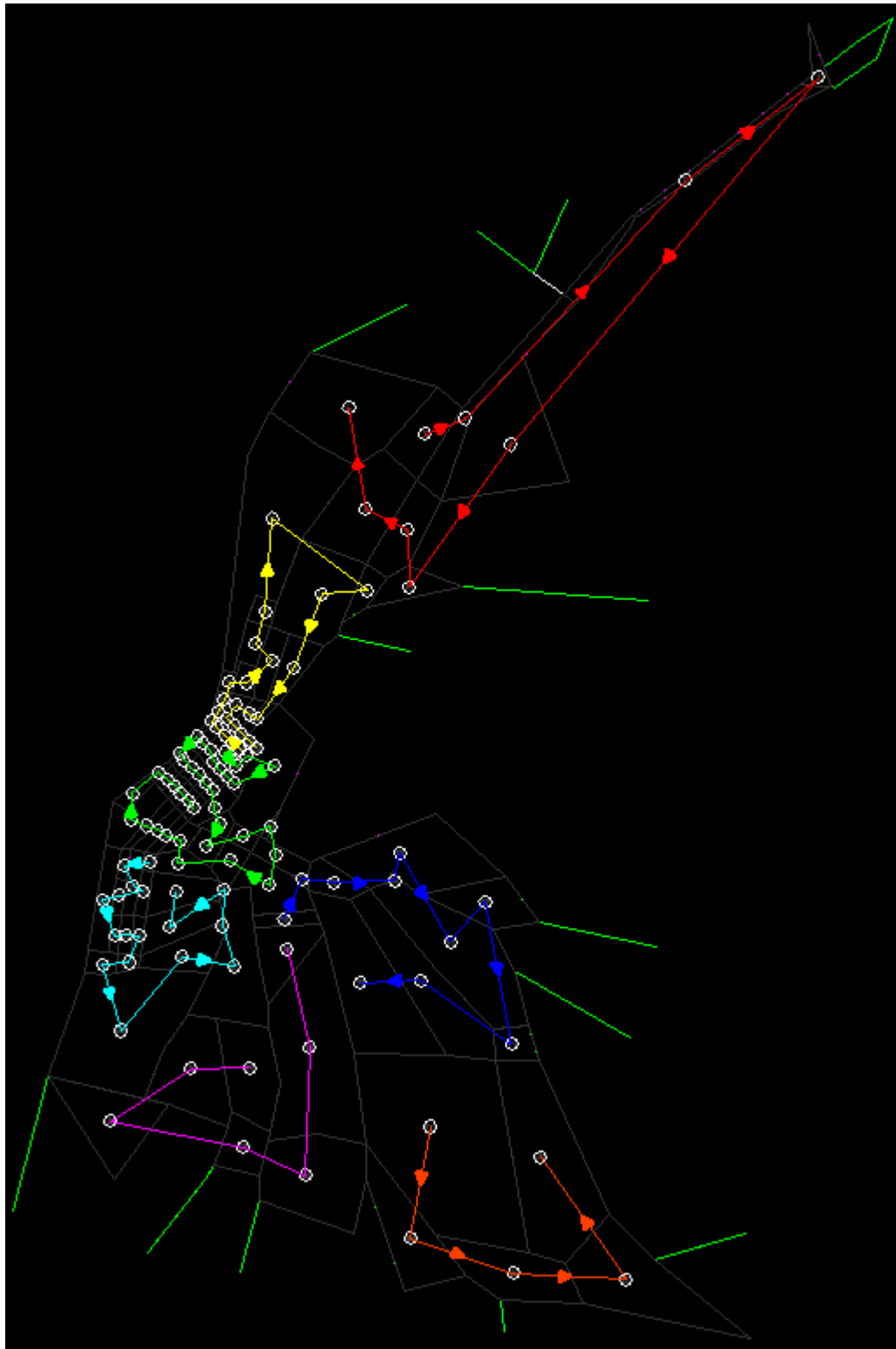
Σχέδιο Δρομολόγησης Ομάδας με 5 Μέλη - Βέλτιστο



Σχέδιο Δρομολόγησης Ομάδας με 6 Μέλη - Βέλτιστο



Σχέδιο Δρομολόγησης Ομάδας με 7 Μέλη - Βέλτιστο



Αποτελέσματα 'χειρότερης' λύσης

Παράμετροι Harmony Search		Παράμετροι Ant Colony	
HMS =	18	m =	45
HMCR =	0,027	A =	0,153
Par =	0,142	B =	-0,017
Επαναλήψεις:	200000	R =	0,604
		Q =	0,151
		Επαναλήψεις:	400
Ταχύτητα Κίνησης Συνεργείων=		11363,914	m/hour
Ταχύτητα Επιθεώρησης =		52,283	m ² /min

Επίλυση Με Ομάδα 2 Συνεργείων

Διαδρομή 1 ^{ου} Συνεργείου:	23 , 29 , 40 , 56 , 31 , 5 , 4 , 39 , 76 , 18 , 30 , 41 , 25 , 8 , 7 , 9 , 3 , 95 , 12 , 14 , 43 , 37 , 32 , 110 , 109 , 108 , 19 , 10 , 21 , 22 , 62 , 74 , 42 , 24 , 52 , 44 , 53 , 111 , 38 , 54 , 27 , 112 , 94 , 17 , 50 , 26 , 49 , 16 , 35 , 11 , 33 , 13,1,2 28 , 34 , 51 , 15 , 93 , 61 , 36 , 45 , 20 , 57 , 6 , 73 , 55 , 48 , 47 , 46
--------------------------------------	---

Διαδρομή 2 ^{ου} Συνεργείου:	77 , 91 , 84 , 78 , 106 , 88 , 70 , 65 , 80 , 96 , 90 , 75 , 87 , 64 , 63 , 79 , 98 , 107 , 97 , 99 , 82 , 69 , 83 , 58 , 92 , 68 85 , 100 , 103 , 104 , 105 , 86 , 66 , 81 , 102 , 89 , 101 , 72 , 67 , 60 , 59 , 71
--------------------------------------	---

Επίλυση Με Ομάδα 3ων Συνεργείων

Διαδρομή 1 ^{ου} Συνεργείου:	25 , 27 , 7 , 112 , 17 , 39 , 14 , 1 , 2 , 11 , 10 , 45 , 40 , 15 24 , 43 , 31 , 8 , 49 , 41 , 76 , 44 , 48 , 47 , 9 , 51 , 34 , 13 4 , 5 , 3 , 6 , 26 , 32 , 28 , 33 , 35 , 20 , 21 , 52 , 38 , 30 , 53 , 50 , 36 , 42 , 18 , 37 , 23 , 56 , 22 , 55 , 46 , 29 , 16 , 19 , 54 , 12
--------------------------------------	---

Διαδρομή 2 ^{ου} Συνεργείου:	69 , 59 , 63 , 66 , 86 , 71 , 77 , 103 , 102 , 89 , 104 , 58 , 72 , 88 , 82 , 83 , 100 , 92 , 78 , 90 , 75 , 85 , 61 , 80 , 65 , 68 , 73 , 70 , 74 , 79 , 62 , 64 , 81 , 87 , 57 , 60 , 91 , 84 , 67
--------------------------------------	--

Διαδρομή 3 ^{ου} Συνεργείου:	107 , 109 , 110 , 111 , 108 , 94 , 97 , 98 , 93 , 96 , 95 , 99 101 , 105 , 106
--------------------------------------	--

Επίλυση Με Ομάδα 4ων Συνεργείων

Διαδρομή 1 ^{ου} Συνεργείου:	9, 3, 2, 1, 4, 5, 6, 7, 13, 10, 12, 112, 11, 8
--------------------------------------	--

Διαδρομή 2 ^{ου} Συνεργείου:	19, 28, 51, 45, 26, 96, 22, 42, 74, 39, 16, 33, 25, 29, 20, 23, 47, 54, 37, 24, 50, 55, 30, 53, 35, 31, 41, 73, 77, 92, 91, 46, 48, 14, 78, 44, 43, 34, 38, 62, 52, 17, 36, 49, 56, 40, 57, 15, 18, 32, 72, 94, 98, 76, 95, 93, 21, 27
--------------------------------------	--

Διαδρομή 3 ^{ου} Συνεργείου:	61, 64, 82, 66, 71, 65, 69, 58, 70, 86, 68, 67, 59, 87, 83, 75, 90, 79, 100, 88, 103, 89, 84, 85, 81, 80, 63, 60
--------------------------------------	--

Διαδρομή 4 ^{ου} Συνεργείου:	109, 111, 107, 99, 97, 102, 105, 101, 104, 106, 108, 110
--------------------------------------	--

Επίλυση Με Ομάδα 5 Συνεργείων

Διαδρομή 1 ^{ου} Συνεργείου:	6, 12, 7, 13, 11, 9, 10, 8, 5, 4, 2, 1, 3
--------------------------------------	---

Διαδρομή 2 ^{ου} Συνεργείου:	23, 33, 16, 22, 29, 14, 18, 50, 31, 38, 27, 20, 35, 19, 40, 41, 51, 43, 74, 55, 25, 36, 77, 91, 47, 49, 42, 76, 46, 44, 73, 32, 52, 62, 54, 39, 26, 112, 21, 24, 45, 56, 57, 37, 28, 30, 48, 53, 34, 17, 15
--------------------------------------	---

Διαδρομή 3 ^{ου} Συνεργείου:	83, 72, 84, 70, 71, 80, 81, 61, 68, 58, 59, 75, 79, 78, 89, 87, 82, 86, 69, 60, 63, 66, 67, 65, 64, 88, 85
--------------------------------------	--

Διαδρομή 4 ^{ου} Συνεργείου:	94, 92, 90, 100, 98, 93, 95, 96, 97, 99, 109, 111
--------------------------------------	---

Διαδρομή 5 ^{ου} Συνεργείου:	103, 104, 105, 106, 110, 108, 107, 101, 102
--------------------------------------	---

Επίλυση Με Ομάδα 6 Συνεργείων

Διαδρομή 1 ^{ου} Συνεργείου:	3, 4, 9, 10, 7, 8, 6, 5, 2, 1
--------------------------------------	-------------------------------

Διαδρομή 2 ^{ου} Συνεργείου:	33, 19, 36, 43, 37, 49, 50, 22, 44, 35, 56, 55, 57, 52, 18, 14, 45, 21, 17, 51, 54, 28, 32, 25, 31, 20, 29, 26, 112, 12, 11, 15, 38, 27, 24, 16, 13, 23, 34, 47, 48, 41, 53, 39, 40, 46, 30, 42
--------------------------------------	---

Διαδρομή 3 ^{ου} Συνεργείου:	89, 86, 80, 81, 64, 69, 58, 60, 59, 72, 82, 68, 83, 70, 66, 63, 61, 67, 62, 65, 71, 88, 87
--------------------------------------	--

Διαδρομή 4 ^{ου} Συνεργείου:	96 , 93 , 90 , 74 , 73 , 75 , 77 , 76 , 79 , 85 , 84 , 91 , 78 , 92 , 98 , 94 , 95
--------------------------------------	---

Διαδρομή 5 ^{ου} Συνεργείου:	102 , 103 , 104 , 105 , 106 , 101 , 97 , 100
--------------------------------------	--

Διαδρομή 6 ^{ου} Συνεργείου:	108 , 110 , 111 , 109 , 99 , 107
--------------------------------------	----------------------------------

Επίλυση Με Ομάδα 7 Συνεργείων

Διαδρομή 1 ^{ου} Συνεργείου:	8 , 9 , 4 , 3 , 1 , 2 , 5 , 6 , 7
--------------------------------------	-----------------------------------

Διαδρομή 2 ^{ου} Συνεργείου:	34 , 19 , 29 , 37 , 24 , 23 , 20 , 17 , 15 , 10 , 11 , 12 , 13 , 14 , 16 , 25 , 38 , 27 , 33 , 26 , 35 , 36 , 31 , 30 , 32 , 21 , 112 , 18 , 28
--------------------------------------	---

Διαδρομή 3 ^{ου} Συνεργείου:	49 , 62 , 53 , 22 , 43 , 48 , 39 , 75 , 72 , 73 , 50 , 52 , 51 55 , 46 , 44 , 76 , 77 , 74 , 40 , 57 , 56 , 54 , 47 , 42 , 69 , 45 , 41
--------------------------------------	---

Διαδρομή 4 ^{ου} Συνεργείου:	80 , 86 , 87 , 84 , 83 , 67 , 58 , 60 , 59 , 71 , 79 , 88 , 82 , 66 , 89 , 68 , 63 , 64 , 70 , 61 , 65 , 81
--------------------------------------	---

Διαδρομή 5 ^{ου} Συνεργείου:	90 , 92 , 78 , 85 , 98 , 97 , 96 , 95 , 93 , 94 , 91
--------------------------------------	--

Διαδρομή 6 ^{ου} Συνεργείου:	102 , 103 , 104 , 105 , 106 , 101 , 100
--------------------------------------	---

Διαδρομή 7 ^{ου} Συνεργείου:	109 , 99 , 107 , 108 , 110 , 111
--------------------------------------	----------------------------------

Χρόνοι Ομάδας 2 Συνεργείων	
Χρόνος Ταξιδιού 1ου Συνεργείου	8,809 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 1ου Συνεργείου	2702,008 ώρες
Συνολικός Χρόνος 1ου Συνεργείου	2710,817 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 2ου Συνεργείου	3,801 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 2ου Συνεργείου	3214,405 ώρες
Συνολικός Χρόνος 2ου Συνεργείου	3218,206 ώρες

Χρόνος Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης	3218,206 ώρες
Συνολικές Μέρες με 2 8ωρες Βάρδιες	201,138 μέρες

Χρόνοι Ομάδας 3 ^{ων} Συνεργείων	
Χρόνος Ταξιδιού 1 ^{ου} Συνεργείου	4,954 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 1ου Συνεργείου	1915,524 ώρες
Συνολικός Χρόνος 1ου Συνεργείου	1920,478 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 2 ^{ου} Συνεργείου	2,446 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 2ου Συνεργείου	2023,577 ώρες
Συνολικός Χρόνος 2ου Συνεργείου	2026,023 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 3 ^{ου} Συνεργείου	1,405 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 3ου Συνεργείου	1977,312 ώρες
Συνολικός Χρόνος 3ου Συνεργείου	1978,717 ώρες

Χρόνος Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης	2026,023 ώρες
Συνολικές Μέρες με 2 8ωρες Βάρδιες	126,626 μέρες

Χρόνοι Ομάδας 4 ^{ων} Συνεργείων	
Χρόνος Ταξιδιού 1 ^{ου} Συνεργείου	1,532 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 1ου Συνεργείου	1192,744 ώρες
Συνολικός Χρόνος 1ου Συνεργείου	1194,276 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 2 ^{ου} Συνεργείου	3,328 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 2ου Συνεργείου	1620,720 ώρες
Συνολικός Χρόνος 2ου Συνεργείου	1623,958 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 3 ^{ου} Συνεργείου	1,342 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 3ου Συνεργείου	1528,909 ώρες
Συνολικός Χρόνος 3ου Συνεργείου	1530,251 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 4 ^{ου} Συνεργείου	1,190 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 4ου Συνεργείου	1574,039 ώρες
Συνολικός Χρόνος 4ου Συνεργείου	1575,230 ώρες

Χρόνος Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης	1623,958 ώρες
Συνολικές Μέρες με 2 8ωρες Βάρδιες	101,497 μέρες

Χρόνοι Ομάδας 5 Συνεργείων	
Χρόνος Ταξιδιού 1ου Συνεργείου	1,342 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 1ου Συνεργείου	1189,906 ώρες
Συνολικός Χρόνος 1ου Συνεργείου	1191,248 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 2ου Συνεργείου	1,909 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 2ου Συνεργείου	842,431 ώρες
Συνολικός Χρόνος 2ου Συνεργείου	844,339 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 3ου Συνεργείου	1,164 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 3ου Συνεργείου	1407,013 ώρες
Συνολικός Χρόνος 3ου Συνεργείου	1408,178 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 4ου Συνεργείου	0,944 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 4ου Συνεργείου	1235,540 ώρες
Συνολικός Χρόνος 4ου Συνεργείου	1236,485 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 5ου Συνεργείου	0,703 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 5ου Συνεργείου	1241,522 ώρες
Συνολικός Χρόνος 5ου Συνεργείου	1242,225 ώρες

Χρόνος Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης	1408,178 ώρες
Συνολικές Μέρες με 2 8ωρες Βάρδιες	88,011 μέρες

Χρόνοι Ομάδας 6 Συνεργείων	
Χρόνος Ταξιδιού 1ου Συνεργείου	1,145 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 1ου Συνεργείου	1002,429 ώρες
Συνολικός Χρόνος 1ου Συνεργείου	1003,574 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 2ου Συνεργείου	1,737 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 2ου Συνεργείου	917,110 ώρες
Συνολικός Χρόνος 2ου Συνεργείου	918,847 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 3ου Συνεργείου	0,844 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 3ου Συνεργείου	1015,419 ώρες
Συνολικός Χρόνος 3ου Συνεργείου	1016,263 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 4ου Συνεργείου	0,790 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 4ου Συνεργείου	1173,464 ώρες
Συνολικός Χρόνος 4ου Συνεργείου	1174,254 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 5ου Συνεργείου	0,635 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 5ου Συνεργείου	1046,494 ώρες
Συνολικός Χρόνος 5ου Συνεργείου	1047,129 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 6ου Συνεργείου	0,502 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 6ου Συνεργείου	761,497 ώρες
Συνολικός Χρόνος 6ου Συνεργείου	761,999 ώρες

Χρόνος Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης	1174,254 ώρες
Συνολικές Μέρες με 2 8ωρες Βάρδιες	73,391 μέρες

Χρόνοι Ομάδας 7 Συνεργείων	
Χρόνος Ταξιδιού 1ου Συνεργείου	1,099 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 1ου Συνεργείου	980,013 ώρες
Συνολικός Χρόνος 1ου Συνεργείου	981,112 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 2ου Συνεργείου	0,798 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 2ου Συνεργείου	539,890 ώρες
Συνολικός Χρόνος 2ου Συνεργείου	540,688 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 3ου Συνεργείου	0,838 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 3ου Συνεργείου	602,171 ώρες
Συνολικός Χρόνος 3ου Συνεργείου	603,009 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 4ου Συνεργείου	0,819 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 4ου Συνεργείου	951,775 ώρες
Συνολικός Χρόνος 4ου Συνεργείου	952,593 ώρες

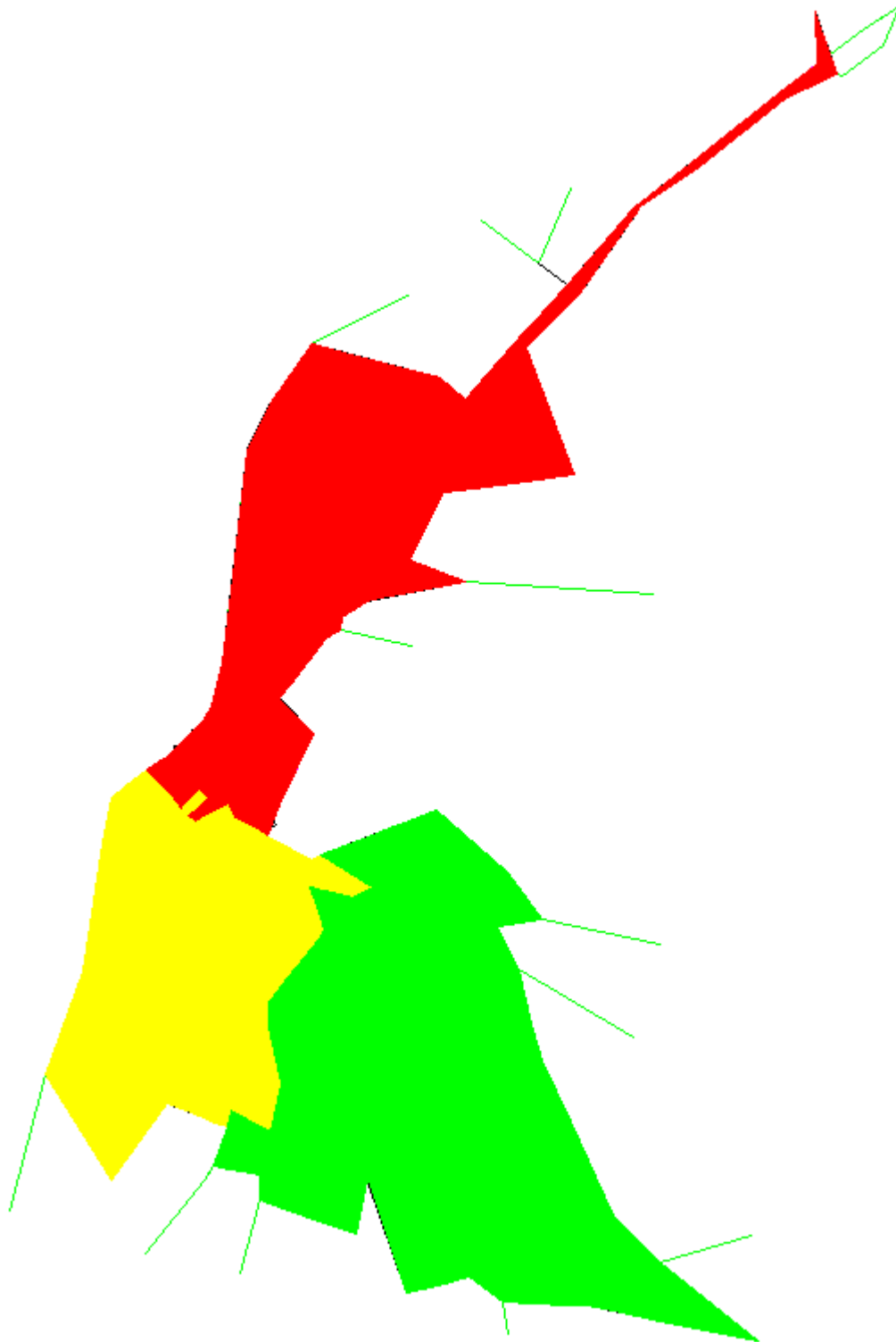
Χρόνος Ταξιδιού 5ου Συνεργείου	0,518 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 5ου Συνεργείου	1176,719 ώρες
Συνολικός Χρόνος 5ου Συνεργείου	1177,237 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 6ου Συνεργείου	0,505 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 6ου Συνεργείου	904,347 ώρες
Συνολικός Χρόνος 6ου Συνεργείου	904,852 ώρες

Χρόνος Ταξιδιού 7ου Συνεργείου	0,502 ώρες
Χρόνος Επιθεώρησης 7ου Συνεργείου	761,497 ώρες
Συνολικός Χρόνος 7ου Συνεργείου	761,999 ώρες

Χρόνος Ολοκλήρωσης Επιθεώρησης	1177,237 ώρες
Συνολικές Μέρες με 2 8ωρες Βάρδιες	73,577 μέρες

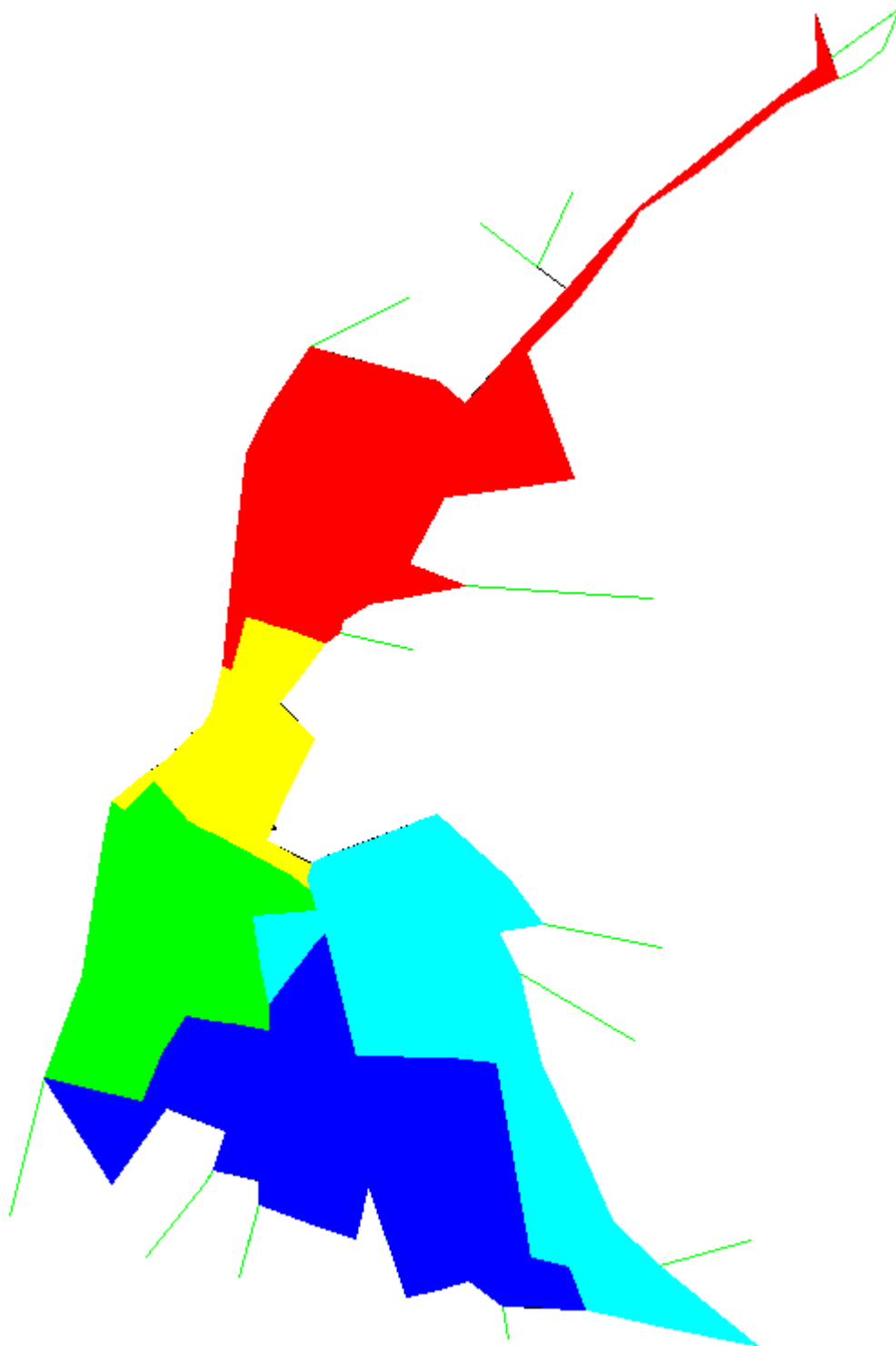
Σχέδιο Περιοχών Ευθύνης Ομάδας με 3 Μέλη - Χειρότερο



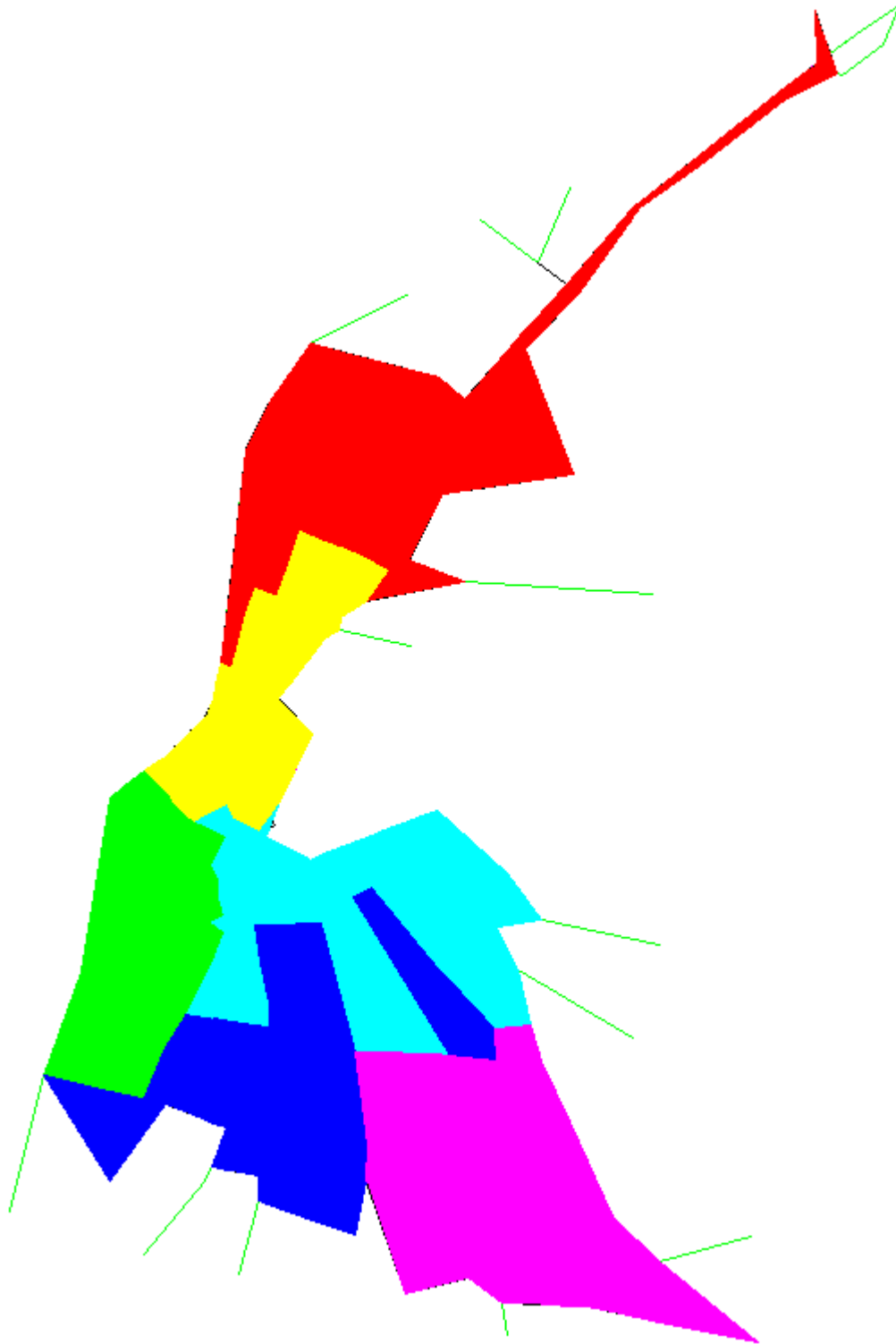
Σχέδιο Περιοχών Ευθύνης Ομάδας με 4 Μέλη - Χειρότερο



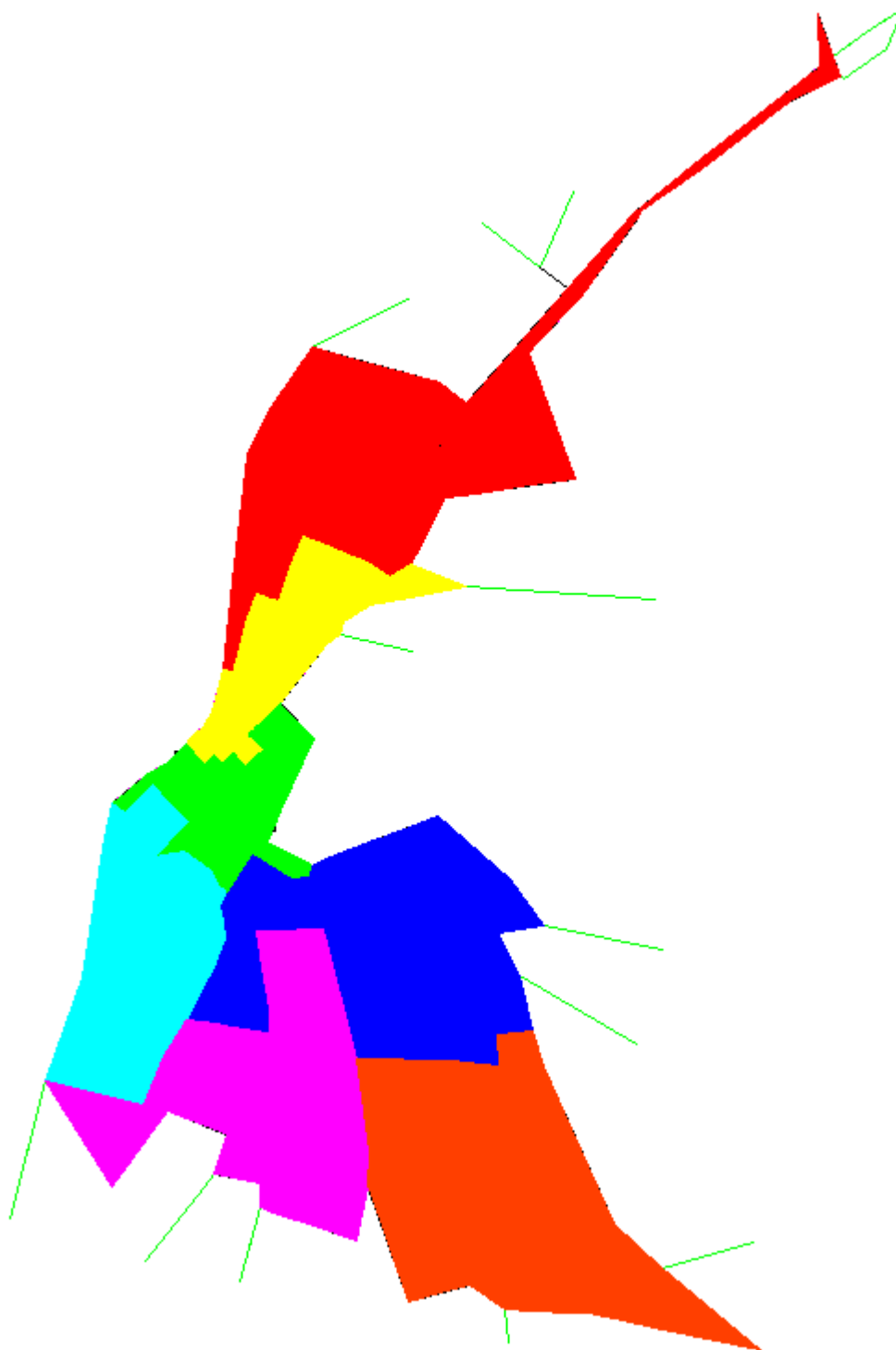
Σχέδιο Περιοχών Ευθύνης Ομάδας με 5 Μέλη - Χειρότερο



Σχέδιο Περιοχών Ευθύνης Ομάδας με 6 Μέλη - Χειρότερο



Σχέδιο Περιοχών Ευθύνης Ομάδας με 7 Μέλη - Χειρότερο



Συμπεράσματα -Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Ο σεισμός είναι φαινόμενο με άμεσο και ενίοτε σημαντικό αντίκτυπο τόσο στις κατασκευές όσο και στις ανθρώπινες κοινωνικοοικονομικές δραστηριότητες. Η αδυναμία πρόβλεψης της εμφάνισής τους αλλά και των συνεπειών του, καθιστούν το σεισμό ως το πλέον επικίνδυνο τυχηματικό φυσικό φαινόμενο. Αυτό άλλωστε δείχνουν και τα αποτελέσματα πληθώρας σεισμικών δράσεων κατά το παρελθόν.

Η αντιμετώπιση των αποτελεσμάτων της σεισμικής δράσης εστιάζεται σε δύο κατευθύνσεις: (α) στον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών με στόχο κατασκευές οι οποίες είναι ανθεκτικές στο φαινόμενο αλλά και οικονομικές και φιλικές προς το περιβάλλον και (β) στη μετασεισμική διαχείριση των αποτελεσμάτων του σεισμού. Είναι άλλωστε σαφές ότι οι κανονισμοί αντισεισμικού σχεδιασμού δεν είναι δυνατόν να καλύψουν όλες τις πτυχές ενός τυχηματικού γεγονότος, ενώ και η πλήρης και πιστή εφαρμογή τους δεν είναι πάντα εφικτή ή δεν επιδιώκεται. Ατέλειες ή κακοτεχνίες στην κατασκευή, εγγενή χαρακτηριστικά αυτής άλλα γεγονότα ή αδυναμία των κανονισμών, της τέχνης και της επιστήμης να καλύψει τα χαρακτηριστικά ενός σεισμικού γεγονότος, μπορούν να οδηγήσουν σε βλάβες και άλλες οδυνηρές συνέπειες (τραυματισμοί, απώλεια ανθρώπινων ζώων κλπ).

Ο ρόλος της μετασεισμικής διαχείρισης πάλι είναι αυτός της αντιμετώπισης και αποκατάστασης των αποτελεσμάτων της μετασεισμικής δράσης. Στόχος είναι η ταχύτερη και οικονομικότερη επαναφορά των υποδομών μιας πληγείσας από σεισμική δράση περιοχής, ώστε αυτή να επανέλθει το συντομότερο δυνατόν σε κανονικούς ρυθμούς ζωής. Ειδικά σε αστικές περιοχές, όπου παρατηρείται συγκέντρωση πληθυσμού, κατασκευών αλλά και πληθώρα σημαντικών κοινωνικοοικονομικών δραστηριοτήτων. οι οποίες δεν είναι δυνατό να διακοπούν επί μακρό χρονικό διάστημα.

Πρωταρχική δραστηριότητα της μετασεισμικής διαχείρισης των υποδομών είναι η αποτίμηση των αποτελεσμάτων του σεισμού. Αυτή πρέπει να πραγματοποιηθεί τάχιστα με τη χρήση συνεργείων επιθεώρησης, τα οποία θα εξετάσουν και θα αποτιμήσουν την κατάσταση των κατασκευών στον αστικό χώρο.

Το κάθε συνεργείο αναλαμβάνει μια περιοχή του αστικού χώρου και εξετάζει την κατάσταση των υποδομών της.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται αυτό ακριβώς το θέμα της μετασεισμικής διαχείρισης κατασκευών: η οργάνωση της επιθεώρησης αυτών. Αναπτύσσεται μεθοδολογία, βασισμένη σε πρότυπο επιχειρησιακής έρευνας, με την οποία επιδιώκεται ο καλύτερος δυνατός διαμερισμός μιας αστικής περιοχής σε περιοχές ευθύνης συνεργείων και η καλύτερη δρομολόγηση αυτών για την ταχύτερη ολοκλήρωση της επιθεώρησης.

Παρουσιάζεται ο αλγόριθμος με τον οποίο καθορίζονται:

- Ο βέλτιστος αριθμός συνεργείων επιθεώρησης
- Οι βέλτιστες περιοχές ευθύνης των συνεργείων (districting)
- Οι βέλτιστες διαδρομές των συνεργείων εντός των περιοχών ευθύνης τους (routing)

ώστε η επιθεώρηση του αστικού χώρου να ολοκληρωθεί εντός συγκεκριμένου (απαιτούμενου) χρονικού διαστήματος. Ο αλγόριθμος, όσον αφορά τις περιοχές ευθύνης των συνεργείων βασίζεται στο πρόβλημα π-διάμεσου (p-median) ενώ όσον αφορά τις βέλτιστες διαδρομές αυτών βασίζεται στο Traveling Salesman Problem (TSP). Στην πρώτη περίπτωση θα εφαρμοστεί μέθοδος επίλυσης με τον γενετικό αλγόριθμο Harmony Search Minimization (HSM) ενώ στη δεύτερη με τον Ant Colony Optimization (ACO).

Το πρότυπο εφαρμόζεται στην πόλη της Πάτρας. Πραγματοποιούνται διαφορετικές επιλύσεις για διαφορετικές παραμέτρους του αλγορίθμου και στις περισσότερες περιπτώσεις προκύπτει 'ποιοτικά' ίδιο αποτέλεσμα, σε μικρά σχετικά χρονικά διαστήματα, γεγονός που αναδεικνύει τη σταθερότητα και την αποδοτικότητα του αλγορίθμου στην επίλυση του προβλήματος. Παράλληλα, τα αποτελέσματα καθαυτά δίνουν εποπτικά μια ομοιόμορφη διαμέριση της Πάτρας σε περιοχές ευθύνης, κάτι που δείχνει και το ορθό της εφαρμογής του συγκεκριμένου αλγορίθμου. Συνολικά, θεωρείται ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία (συνδυασμός οικοδομικών τετραγώνων, ζήτησης ανάλογης της δόμησης και προτύπου π-διάμεσου) μπορούν να δώσουν χρήσιμες πρώτες πληροφορίες για τις περιοχές ευθύνης που πρέπει να αναλάβει το κάθε συνεργείο επιθεώρησης.

Το παρόν πρότυπο βέβαια παρουσιάζει αφενός μια μόνο πλευρά της μετασεισμικής διαχείρισης, αφετέρου δε είναι ιδιαίτερα απλοποιημένο. Ως προς τη μετασεισμική διαχείριση, έχουν υπάρξει διάφορες εργασίες στο παρελθόν που εστιάζονται στις επιθεωρήσεις γεφυρών, στην κατανομή πόρων επισκευών, στην αποτίμηση της κατάστασης των υποδομών, στις διαδρομές επιθεώρησης, στην

εκκένωση του πληθυσμού κ.α. Παρόλα αυτά υπάρχει πεδίο έρευνας στην ανάπτυξη και εφαρμογή μαθηματικών εργαλείων για τη μετασεισμική διαχείριση των κατασκευών. Σε ό,τι αφορά στο πρότυπο καθαυτό, η απλοποιημένη μορφή της ζήτησης ως συνάρτησης της δομήσιμης επιφάνειας μπορεί να βελτιωθεί με το συνυπολογισμό άλλων παραγόντων, όπως η παλαιότητα των κατασκευών, ο πληθυσμός κ.α. Ο χρόνος επιθεωρήσεων μιας περιοχής είναι επίσης ένας παράγοντας που μπορεί να ληφθεί υπόψη, τουλάχιστον για επιχειρησιακούς λόγους. Επίσης, η εφαρμογή της μεθόδου και η επίλυση με γενετικούς αλγόριθμους είναι καλό να εξεταστούν και σε αστικούς χώρους μεγαλύτερων διαστάσεων, ώστε να αξιολογηθεί καλύτερα η απόδοση της μεθόδου. Εναλλακτικά, και άλλες μέθοδοι διαμέρισης πρέπει να εξεταστούν.

Συνολικά, η προτεινόμενη προσέγγιση θεωρείται ότι παρέχει τη βάση για την ανάπτυξη εξελιγμένων εργαλείων μετασεισμικής διαχείρισης των κατασκευών.

Βιβλιογραφία

-
- [1] Eiben, A.E., Smith, J.E. Introduction to Evolutionary Computing, Springer - Verlag, Berlin, Germany.
- [2] Gen, M, Cheng, R. (1999). Genetic Algorithms and Engineering Optimization, Interscience, U.S.A.
- [3] Beasley, J.E., Chu, P.C. A genetic algorithm for the set-covering problem. European Journal of Operational Research, Vol. 94, pp. 392-404.
- [4] Bozkaya, B., Zhang, J., Erkut, E. (2002). An efficient genetic algorithm for the p-median problem. In: Facility Location: Applications and Theory, Eds Z. Drezner, [5] H. W. Hamacher, Springer, New York, U.S.A.
- Winston, W. (1994). Operations Research: Applications and Algorithms 3rd Ed, International Thompson Publishing, U.S.A.
- [6] Geem ZW (2008) Novel derivative of harmony search algorithm for discrete design variables. Applied Mathematics and Computation 199:223-230
- [7] Geem ZW (2009) Music-inspired harmony search algorithm: theory and applications. Springer, Berlin
- [8] Geem ZW (2009) Harmony search algorithms for structural design optimization. Springer, Berlin
- [9] Mahdavi M, Fesanghary M, Damangir E (2007) An improved harmony search algorithm for solving optimization problems. Applied Mathematics and Computation 188:1567-1579
- [10] Mukhopadhyay A, Roy A, Das S, Das S, Abraham A (2008) Population-variance and explorative power of harmony search: an analysis. In Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Digital Information Management (ICDIM 2008), 13-16
- [11] Geem ZW (2006) Optimal cost design of water distribution networks using harmony search. Engineering Optimization 38:259-280

- [12] Wang CM, Huang YF (2009) Self-adaptive harmony search algorithm for optimization. *Expert Systems with Applications*, Online: doi:10.1016/j.eswa.2009.09.008
- [13] Degertekin S (2008) Optimum design of steel frames using harmony search algorithm. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 36:393-401
- [14] Geem ZW (2006) Improved harmony search from ensemble of music players. *Lecture Notes in Artificial Intelligence* 4251:86-93
- [15] Geem ZW State-of-the-Art in the Structure of Harmony Search Algorithm pp. 1-10
- [16] Saka M.P. , Erdal F. Harmony Search Based Algorithm for the Optimum Design of Grillage Systems to LRFD - AISC pp. 5-16
- [17] Daskin M.S. and Haghani A. (1984), Multiple vehicle routing and dispatching to an emergency scene, *Environment and Planning A* 16, pp. 1349-1359
- [18] Gen, M, Cheng, R. (1999). *Genetic Algorithms and Engineering Optimization*, Interscience, U.S.A.
- [19] Hakimi S.L. (1964), Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph, *Operations Research* 12, pp. 450-459
- [20] Karlaftis, M., Kepaptsoglou, K., Lambropoulos, S. (2007) "Fund Allocation for Transportation Network Recovery Following Natural Disasters". *Journal of Urban Planning and Development*, 133(1), 1-8.
- [21] Marianov, V., Serra, D. (2002). "Location Models in the Public Sector". In: *Facility Location: Applications and Theory*, Eds. Z. Drezner and H.W. Hamacher, Springer, Berlin.
- [22] Schilling D.A., Jayaraman V., Barkhi R. (1993), A review of covering problems in facility location, *Location Science* Vol.1, No 1, pp. 25-55
- [23] Winston, W. L. (1994). *Operations research: Applications and algorithms* (3rd ed.). Belmont, CA: Duxbury Press.
- [24] Dorigo, M.: *Optimization, Learning and Natural Algorithms*. Politecnico di Milano, Milano (1992)
- [25] Dorigo, M., Stützle, T.: *Ant Colony Optimization*. The MIT Press, Cambridge (2004)
- [26] Lagaros, N., Plevris, V., Papadrakakis, M., *Neurocomputing Strategies for Solving Reliability-Robust Design Optimization Problems*, pp. 8-11

[27] ΟΑΣΠ, Επιχειρησιακό Σχέδιο Έκτακτης Ανάγκης «Ξενοκράτης - Σεισμοί»
(Ιούνιος 1999)

[28] ΥΠΕΚΑ, Γενικός Οικοδομικός Κανονισμός

Εικόνα Εξωφύλλου: Σύθεση 2 Εικόνων: beyondtheblueeventhorizon.blogspot.com
Wikipedia.org

Αθήνα, 2011
