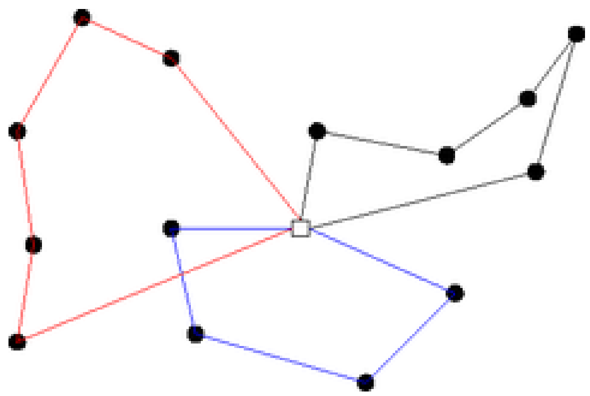
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΩΝ ΛΕΩΦΟΡΕΙΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΡΟ



Αναστάσιος Χαρίσης

Επιβλέπων:

Κωνσταντίνος Κεπαπτσόγλου, Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2016

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο τον σχεδιασμό δικτύου τροφοδοτικών λεωφορείων με στόχο την αποτελεσματική μεταφορά επιβατών σε πολλαπλούς σταθμούς μετρό. Η υπηρεσία σχεδιάστηκε με βάση τα συστήματα «Ανταποκρινόμενης στη ζήτηση μεταφοράς», έτσι χρησιμοποιήθηκε μια υπηρεσία μεταφοράς από λεωφορεία με ομοιογενή στόλο ώστε να ικανοποιήσει τις καθημερινές απαιτήσεις μετακίνησης. Το πρότυπο που δημιουργείται λαμβάνει τη μορφή ενός προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων από πολλαπλές προελεύσεις σε πολλαπλούς προορισμούς με περιορισμούς στη χωρητικότητα. Για την επίλυση του προβλήματος εφαρμόζεται ένας γενετικός αλγόριθμος μέσω του οποίου παράγονται διαδρομές που ικανοποιούν τη ζήτηση προς όλους τους σταθμούς μετρό. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως ο αλγόριθμος παράγει λογικά αποτελέσματα σε μικρούς υπολογιστικούς χρόνους, επιτρέποντας έτσι τη δημιουργία διαδρομών ανάλογα με τη ζήτηση, όπως υπαγορεύεται από καθημερινά πρότυπα.

ABSTRACT

This study deals with the design of a feeder bus network service in order to efficiently transport passengers to multiple major subway stations. The service is designed under the context of demand responsive transport, thus a shuttle service with a homogeneous fleet is employed to satisfy daily transportation requests. The problem is modeled as a many-to-many capacitated vehicle routing problem. A genetic algorithm is applied to the problem and routes accommodating demand for all subway stations are generated. Results show that the algorithm is able to produce results in short computational times, thus allowing for on-demand route generation as dictated by daily patterns.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Λέκτορα της Σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ Κωνσταντίνο Κεπαπτσόγλου, αρχικά για τη δυνατότητα που μου προσέφερε να καταπιαστώ με ένα πραγματικά ενδιαφέρον αντικείμενο στα πλαίσια της διπλωματικής μου εργασίας και έπειτα για την πολύτιμη καθοδήγηση του για το διάστημα που συνεργαστήκαμε.

Επιπλέον θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στη διπλωματούχο Πολιτικό Μηχανικό ΕΜΠ Χριστίνα Ηλιοπούλου για την καθοριστική βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας και τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε.

Τέλος, ευχαριστώ πολύ την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την αμέριστη υποστήριξη που μου έδειξαν σε όλα τα χρόνια της φοιτητικής μου πορείας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μεγάλη αύξηση της ιδιοκτησίας Ι.Χ. στην εποχή μας έχει οδηγήσει σε σημαντικά προβλήματα στις μετακινήσεις και σε σημαντική αύξηση των χρόνων διαδρομής, ειδικότερα στις μεγάλες πόλεις. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να μειωθεί σε σημαντικό βαθμό με τη χρήση των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς, έτσι λοιπόν οι αστικές συγκοινωνίες θα πρέπει να αποτελούν ένα αναπόσπαστο κομμάτι για κάθε σύγχρονο Μητροπολιτικό Κέντρο. Όταν αναφερόμαστε στα συστήματα αστικών συγκοινωνιών εννοούμε μια συλλογή από [Καρλαύτης και Λυμπέρης, (2009)]:

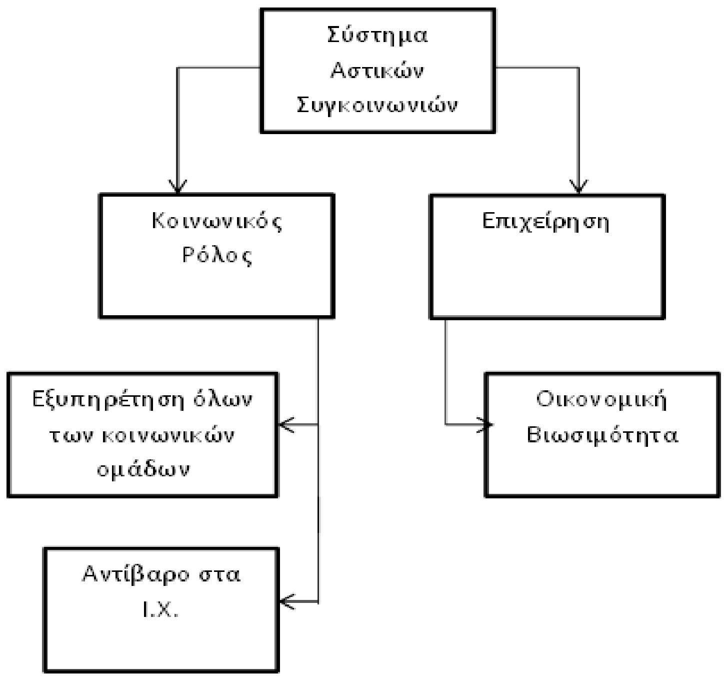
- Υποδομές (οχήματα, διάδρομοι κίνησης, εγκαταστάσεις επιβίβασης-αποβίβασης, χώροι στάθμευσης και συντήρησης)
- Άτομα (οδηγοί, διοικητικό προσωπικό, προσωπικό συντήρησης)
- Διαδικασίες (σχεδιασμός, λειτουργία, διαχείριση)

με τις οποίες παρέχονται μεταφορικές υπηρεσίες.

Τα δίκτυα αστικών συγκοινωνιών προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα στις σύγχρονες κοινωνίες όπως την αποφυγή κυκλοφοριακής συμφόρησης, τη μεγαλύτερη ταχύτητα στις μετακινήσεις, την προστασία του περιβάλλοντος, λόγω μείωσης των εκπεμπόμενων ρύπων από τα οχήματα αλλά και την εξοικονόμηση ενέργειας. Αναλυτικότερα, ο ρόλος των αστικών συγκοινωνιών στις πόλεις έχει τρεις διαστάσεις [Καρλαύτης και Λυμπέρης, (2009)]:

- Την κοινωνική διάσταση, μέσω της εξασφάλισης για το σύνολο των κατοίκων μιας πόλης, ενός ελαχίστου επιπέδου κινητικότητας και δικαιώματος στις μετακινήσεις. Ένα μεγάλο τμήμα του πληθυσμού των πόλεων δεν έχει είτε το δικαίωμα (νεαρά άτομα, άτομα με κινητικές δυσκολίες, ηλικιωμένοι) είτε τη δυνατότητα χρήσης ΙΧ (π.χ. οικογένειες με χαμηλό εισόδημα), έτσι οι αστικές συγκοινωνίες αποτελούν για αυτό τη μοναδική επιλογή για μετακίνηση στις πόλεις. Επιπρόσθετα, οι αστικές συγκοινωνίες αποτελούν βασικό τρόπο μετακίνησης για επισκέπτες από άλλες περιοχές.

- Τη δεύτερη διάσταση, η οποία αναφέρεται στο ρόλο που έχουν οι αστικές συγκοινωνίες ως αντίβαρο στη χρήση ΙΧ. Συγκοινωνίες που προσφέρουν αξιόπιστη και υψηλού επιπέδου εξυπηρέτηση, ως προς το κόστος, την ταχύτητα μετακίνησης αλλά και το επίπεδο άνεσης, μπορούν να συντελέσουν στη μείωση της χρήσης ΙΧ και την επιλογή των Μέσων Μεταφοράς για τις μετακινήσεις. Η επιλογή αυτή έχει θετικές επιπτώσεις στο αστικό περιβάλλον, φυσικό και κοινωνικοοικονομικό.
- Την τρίτη διάσταση, η οποία αφορά την οικονομική βιωσιμότητα των αστικών συγκοινωνιών ως φορέων, καθώς ο ρόλος τους είναι διαφορετικός από χώρα σε χώρα. Για παράδειγμα, στη Γαλλία αντιμετωπίζονται ως κοινωνικά αγαθά και τους παρέχεται υψηλή κρατική στήριξη, σε αντίθεση με τη Βρετανία όπου οι συγκοινωνίες θεωρούνται και αντιμετωπίζονται ως επιχειρήσεις.



Σχήμα 1.1: Ρόλος του συστήματος αστικών συγκοινωνιών [Πηγή: Συστήματα Αστικών Συγκοινωνιών, Καρλαύτης Λυμπέρης (2009)]

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη προτύπου για το βέλτιστο σχεδιασμό ενός δικτύου τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείων. Το πρόβλημα αυτό αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως "Feeder Bus Network Design Problem" ("FBNDP"). Με τον όρο τροφοδοτικές γραμμές αναφερόμαστε σε δίκτυα μεταφορών τα οποία έχουν ως στόχο τη σύνδεση μιας αστικής ή και μη περιοχής με κάποιον ή κάποιους σταθμούς μέσων σταθερής τροχιάς (μετρό, τραμ). Στόχος συνεπώς της μελέτης είναι η εύρεση των διαδρομών που θα συνδέουν μια περιοχή με σταθμούς μετρό με το ελάχιστο δυνατό κόστος, δηλαδή από την χρονική διάρκεια των διαδρομών, από τον αριθμό των διαδρομών και από τον αριθμό των ατόμων που δεν εξυπηρετούνται από το δίκτυο.

Το πρόβλημα υπάγεται στην κατηγορία προβλημάτων NP-Hard ακέραιου, μη γραμμικού προγραμματισμού, δηλαδή κάποιων από τα πολυπλοκότερα προβλήματα βελτιστοποίησης, με πολλές άγνωστες μεταβλητές και περιορισμούς. Η συγκεκριμένη έρευνα διαφέρει αρκετά από τις περισσότερες που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα σε δυο σημαντικά σημεία, που την καθιστούν και πιο πολύπλοκη από αυτές:

- Αρχικά, οι περισσότερες μελέτες της διεθνούς βιβλιογραφίας αφορούν τον σχεδιασμό δικτύου που ενώνουν μια περιοχή με έναν μόνο σταθμό μέσου σταθερής τροχιάς, ανήκουν στην κατηγορία μελετών που ονομάζονται Many-to-One, δηλαδή πολλών προελεύσεων και ενός προορισμού. Αντίθετα η μελέτη μας συνδέει μια περιοχή με τρεις διαφορετικούς σταθμούς σταθερής τροχιάς ταυτόχρονα, ανήκει δηλαδή στην κατηγορία Many-to-Many, πολλών προελεύσεων και πολλών προορισμών.
- Ακόμη οι περισσότερες μέχρι τώρα έρευνες πάνω στο ζήτημα υποθέτουν πως η ζήτηση για την μετακίνηση προς τους σταθμούς μετρό παραμένει σταθερή, και συνεπώς ανάλογα με τη ζήτηση που υπάρχει οι διαδρομές εκτελούνται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη διάφορες διακυμάνσεις που μπορεί να προκύψουν σε αυτή. Η έρευνα μας όμως διαφοροποιείται σημαντικά σε αυτό το κομμάτι, καθώς η ζήτηση για

μετακίνηση στους σταθμούς μετρό δεν είναι προκαθορισμένη, αλλά το μοντέλο έχει δημιουργηθεί ώστε να ανταποκρίνεται σε κάθε τυχόν αύξηση ή μείωση αυτής, ανήκοντας στην κατηγορία μελετών «Demand Responsive Transport (DRT)» που θα επεξηγηθούν αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

1.3 ΔΟΜΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένης της εισαγωγής, καθώς και από το τη λίστα με τις βιβλιογραφικές πηγές και το παράρτημα.

Το κεφάλαιο 1 αποτελεί την εισαγωγή στην εργασία, εξηγώντας το αντικείμενο αλλά και τη χρησιμότητα της μελέτης.

Το κεφάλαιο 2 αποτελεί το κομμάτι όπου πραγματοποιείται εισαγωγή στα δίκτυα μεταφορών και στο πρόβλημα βέλτιστου σχεδιασμού τροφοδοτικών γραμμών και εκτενής ανασκόπηση της υφιστάμενης βιβλιογραφίας που το αφορά, με κύρια έμφαση να δίνεται στους διάφορους τρόπους με τους οποίους έχουν επιλυθεί τα προβλήματα αυτά. Ακόμη περιγράφεται η κατηγορία DRT που αποτελεί τον τρόπο με τον οποίο εξυπηρετείται η ζήτηση στην έρευνα.

Στο κεφάλαιο 3 πραγματοποιείται περιγραφή του μαθηματικού προτύπου, δηλαδή της αντικειμενικής συνάρτησης που αποτελεί την προς βέλτιστη επίλυση συνάρτηση καθώς και των περιορισμών που τη συνοδεύουν. Ακόμη γίνεται μια σύντομη αναφορά στη γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic, με την οποία συγγράφηκε ο κώδικας και ακολούθως πραγματοποιείται μια αναφορά στα βασικά σημεία των γενετικών αλγορίθμων, οι οποίοι αποτελούν τον τρόπο με τον οποίο επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί η βελτιστοποίηση. Τέλος περιγράφεται ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για την επίλυση του προβλήματος.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου στο πρόβλημα όπως και η βέλτιστη τελικά λύση του προβλήματος και ακόμη πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας για διάφορες παραμέτρους του μοντέλου.

Το κεφάλαιο 5 περιέχει τα συμπεράσματα που απορρέουν από την πραγματοποίηση της εργασίας καθώς και διάφορες προτάσεις για περεταίρω ανάπτυξη της έρευνας πάνω στο πρόβλημα.

Στο κεφάλαιο της βιβλιογραφίας δίνεται η λίστα με όλες τις βιβλιογραφικές αναφορές που χρησίμευσαν ως πηγές για την εργασία.

Στο παράρτημα παρατίθεται ο κώδικας που αναπτύχθηκε για την εφαρμογή του γενετικού αλγόριθμου και την επίλυση του προβλήματος στη γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται μια εισαγωγή στο πρόβλημα του σχεδιασμού δικτύων, ορίζοντας το πρόβλημα και αναφέροντας τους στόχους του και τρόπους επίλυσης του. Επιπρόσθετα γίνεται μια εκτενής ανασκόπηση των κυριότερων εργασιών που έχουν πραγματοποιηθεί στο πρόβλημα του σχεδιασμού τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείων, όπου αναλύονται τα μοντέλα που έχουν χρησιμοποιηθεί και η μεθοδολογία επίλυσης των προβλημάτων. Τέλος, περιγράφονται τα συστήματα DRT (Demand Responsive Transport) που αποτελούν τη μεθοδολογία με την οποία εξυπηρετείται η ζήτηση στο μοντέλο που θα κατασκευαστεί στην εργασία.

2.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

2.2.1 Ορισμός

Το πρόβλημα δικτύου αφορά στην περίπτωση «οποιουδήποτε συνδυασμού ανθρώπων, δραστηριοτήτων αλλά και αντικειμένων, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με νοητές ή απτές διασυνδέσεις για την επίτευξη ενός έργου ή μεταφοράς ή απλής επικοινωνίας» (Καρλαύτης και Λαγαρός, 2010). Τέτοιου τύπου προβλήματα βρίσκουν ποικίλες εφαρμογές στον χώρο των μεταφορών και των επικοινωνιών και γι’ αυτό τον λόγο απασχολούν μεγάλο κομμάτι της διεθνούς έρευνας.

Τα προβλήματα σχεδιασμού δικτύων μπορούν να έχουν πολλούς διαφορετικούς στόχους, όπως η μείωση του κόστους μεταφοράς αγαθών ή ατόμων, η αύξηση της ποσότητας αγαθών ή ατόμων που θα μεταφερθούν, η κατά το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση του χρόνου μετακίνησης και πολλοί άλλοι. Έτσι τα προβλήματα αυτά υπάγονται στην κατηγορία προβλημάτων βελτιστοποίησης, όπου στόχος είναι η ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Τις περισσότερες φορές μαζί με την αντικειμενική συνάρτηση τίθενται και κάποιοι περιορισμοί οι οποίοι πρέπει να ικανοποιούνται και αναφέρονται συνήθως στις ελάχιστες ή μέγιστες απαιτήσεις του συστήματος αλλά και στους περιορισμούς στους διαθέσιμους πόρους.

Στις περισσότερες περιπτώσεις τα προβλήματα δικτύων επιλύονται με τη χρήση προσεγγιστικών μεθόδων (heuristics). Αυτό συμβαίνει διότι, για κάθε δίκτυο που αποτελείται από n κόμβους, υπάρχουν $[n \cdot (n-1)/2]$ δυνατές συνδέσεις που ενώνουν τους κόμβους μεταξύ τους ανά δύο. Έτσι γίνεται φανερό πως στα προβλήματα αυτά, ειδικά όταν περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό κόμβων, ο εντοπισμός της βέλτιστης δυνατής λύσης αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία. Συνεπώς θεωρείται πως οι προσεγγιστικές μέθοδοι μπορούν να αποδώσουν με τον καλύτερο τρόπο την πολυπλοκότητα αυτή και να οδηγήσουν στα βέλτιστα αποτελέσματα.

2.2.2 Τροφοδοτικές γραμμές λεωφορείων

Το υπό μελέτη πρόβλημα (Feeder Bus Network Design Problem- FBNDP) αποτελεί μια εξειδικευμένη μορφή του προβλήματος της κατασκευής δικτύων μεταφορών ή όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο του προβλήματος σχεδιασμού δικτύου αστικών συγκοινωνιών (Transit Route Network Design Problem– TRNDP). Συγκεκριμένα στόχος της μελέτης είναι ο προσδιορισμός της λεωφορειακής γραμμής που θα συνδέει μια περιοχή με έναν σταθμό του μετρό με τον βέλτιστο τρόπο. Η κατηγορία αυτή των δικτύων αποτελεί αντικείμενο έρευνας για την παγκόσμια κοινότητα εδώ και πολλά χρόνια, με το ενδιαφέρον προς αυτή να μεγαλώνει όλο και περισσότερο, ειδικά με την εξέλιξη και τη βελτίωση των μέσων σταθερής τροχιάς τα τελευταία χρόνια.

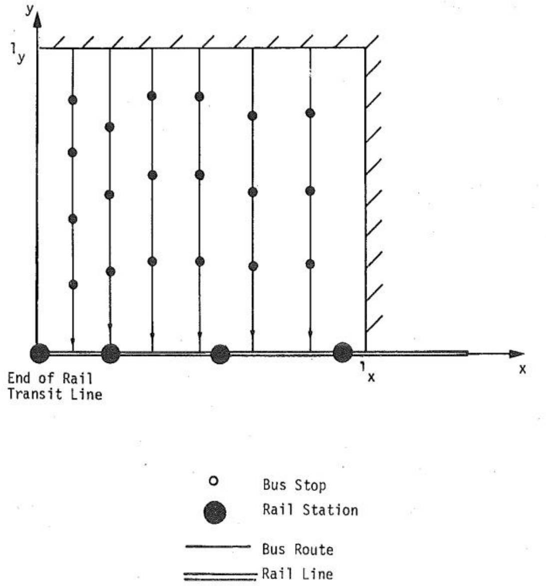
Οι μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί παρουσιάζουν ποικιλία ως προς τη μεθοδολογία επίλυσης, τους στόχους που καλούνται να πραγματοποιήσουν μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης, τους περιορισμούς που τίθενται αλλά και την εφαρμογή τους σε πραγματικές περιπτώσεις. Παρακάτω θα παρουσιαστεί μια αναλυτική περίληψη των σημαντικότερων ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί στο πρόβλημα όλα αυτά τα χρόνια αλλά και ένας συγκεντρωτικός πίνακας των δεδομένων που απορρέουν από αυτά.

2.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Μια από τις πρώτες και πιο σημαντικές μελέτες πάνω στο πρόβλημα του σχεδιασμού δικτύου τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείων, η οποία αποτέλεσε και βάση για πολλές μεταγενέστερες, πραγματοποιήθηκε από τους Kuah, Perl (1988). Αυτοί, δημιούργησαν ένα αναλυτικό μοντέλο για την επίλυση του προβλήματος, θεωρώντας πως είναι απαραίτητο, εκτός από τις βέλτιστες διαδρομές λεωφορείων και τις συχνότητες που θα κινούνται, να ληφθεί υπόψη ως μεταβλητή σχεδιασμού και η διάταξη των στάσεων των λεωφορείων. Αυτή την απόφαση τη βάσισαν στη λογική πως η χωροθέτηση των στάσεων είναι αλληλένδετη με τις άλλες δυο μεταβλητές και με την επίλυση του προβλήματος καθώς στην αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνεται ως μεταβλητή απόφασης και ο χρόνος μέχρι να φτάσουν οι επιβάτες στις στάσεις. Έτσι είναι σημαντικό οι στάσεις να βρίσκονται στις κατάλληλες θέσεις ώστε ο χρόνος αυτός να είναι ο μικρότερος δυνατός. Στόχο της μελέτης τους αποτέλεσε η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, που αποτελείται από το κόστος προς τους επιβάτες και το κόστος των υπηρεσιών συγκοινωνίας. Το κόστος των επιβατών περιλαμβάνει το κόστος του χρόνου που απαιτείται μέχρι να φτάσουν οι επιβάτες στις στάσεις των λεωφορείων, το κόστος του χρόνου αναμονής στις στάσεις, και του χρόνου ταξιδιού. Από την άλλη, το κόστος των συγκοινωνιών αποτελείται από το κόστος του χρόνου λειτουργίας του λεωφορείου και το κόστος του χρόνου που χάνεται κατά τις στάσεις των λεωφορείων. Κατά την κατασκευή της αντικειμενικής συνάρτησης τέθηκαν κάποιοι περιορισμοί για τη διευκόλυνση της επίλυσης του προβλήματος:

- Η ζήτηση για τη χρήση των λεωφορείων είναι ανελαστική
- Η μελέτη πραγματοποιείται για την ώρα αιχμής
- Τα λεωφορεία σταματούν σε όλες τις στάσεις
- Οι επιβάτες επιλέγουν τη στάση λεωφορείου που βρίσκεται στην κοντινότερη απόσταση
- Οι αποστάσεις μεταξύ των διαδρομών των λεωφορείων αλλά και των στάσεων αυτών θεωρούνται μικρές σε σχέση με τις διαστάσεις της περιοχής εξυπηρέτησης (L_x,L_y)

- Οι αποστάσεις μεταξύ των σταθμών τρένου θεωρούνται μικρές σε σχέση με την κάθετη διάσταση της περιοχής (Ly)
- Αντίστοιχα, οι αποστάσεις που διασχίζονται από τα τροφοδοτικά λεωφορεία μαζί με τη σιδηροδρομική γραμμή θεωρούνται μικρές σε σχέση με το συνολικό μήκος διαδρομής



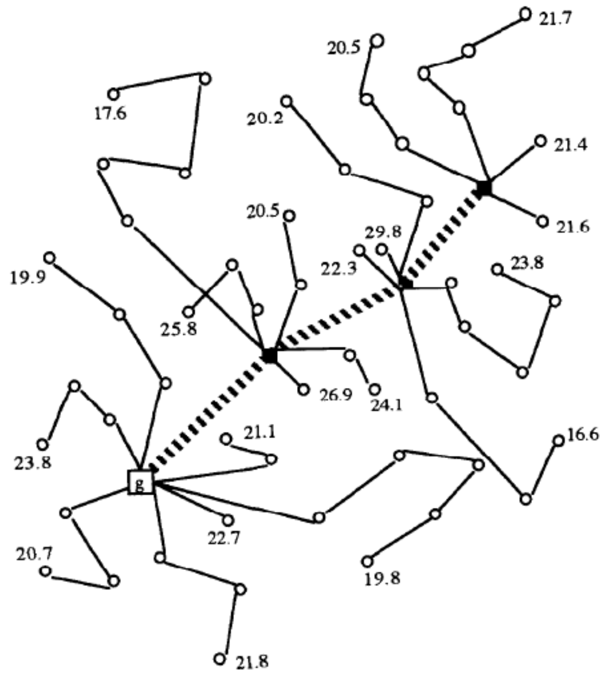
Σχήμα 2.1: Γεωμετρία της περιοχής εξυπηρέτησης (Πηγή: Optimization of feeder bus routes and bus stop spacing, G.K. Kuah, J. Perl 1988)

Στόχος συνεπώς της αντικειμενικής συνάρτησης είναι η εύρεση των διαδρομών, συχνοτήτων και οι θέσεις των στάσεων των λεωφορείων που εξυπηρετούν με τον βέλτιστο τρόπο τη ζήτηση. Οι διατάξεις των διαδρομών των λεωφορείων r(x) και των συχνοτήτων h(x) εκφράζονται ως συναρτήσεις της απόστασης x από το τέλος της σιδηροδρομικής γραμμής ενώ η διάταξη των στάσεων των λεωφορείων s(x,y) εκφράζεται ως συνάρτηση της τοποθεσίας της διαδρομής (x) και της απόστασης της σιδηροδρομικής γραμμής (y). Όσον αφορά τη χωροθέτηση (Spacing) των στάσεων, εξετάστηκαν 3 διαφορετικές περιπτώσεις: α) ενιαία διάταξη s(x,y)=s β) σταθερή διάταξη κατά μήκος των διαδρομών s(x,y)=s(x) γ) μεταβλητή διάταξη s(x,y).

Σε συνέχεια της προηγούμενης προσέγγισης, σύμφωνα με τους Martins, Pato (1996), το FBNDP αποτελεί ένα μη-γραμμικό πρόβλημα με πολυπλοκότητα στους υπολογισμούς το οποίο επιλύεται καλύτερα με την δεύτερη κατηγορία μοντέλων και μέσω ευριστικών μεθόδων, για την παραγωγή καλών αποτελεσμάτων.

Οι ευριστικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στη μελέτη είναι δυο ειδών: αρχικά επιλέγεται μια εκ της Διαδοχικής Κατασκευής (Sequential Building) ή Κατασκευής Δυο Φάσεων (Two-Phase Building) για την παραγωγή αρχικών αποτελεσμάτων, και ύστερα μια εκ των μεθόδων Μετακίνησης (Displacement) ή Ανταλλαγής (Exchange), για την βελτίωση των αποτελεσμάτων. Τέλος χρησιμοποιείται η μέθοδος αναζήτησης Tabu, με την οποία λαμβάνονται υπόψη και κάποιες λύσεις οι οποίες πιθανόν να μην είχαν ελεγχθεί με τις προηγούμενες μεθόδους, δίνοντας έτσι την καλύτερη δυνατή λύση. Στόχος της μελέτης τους είναι η εύρεση των κατάλληλων διαδρομών και συχνοτήτων των λεωφορειακών γραμμών σύμφωνα με τις οποίες θα επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, που περιλαμβάνει το κόστος των επιβατών στα μέσα και το κόστος των υπηρεσιών συγκοινωνίας. Το κόστος των επιβατών περιλαμβάνει το κόστος ταξιδιού και αναμονής στο λεωφορείο και στο Μετρό. Αντίστοιχα το κόστος των υπηρεσιών εξαρτάται κυρίως από την απόσταση που διανύουν τα οχήματα. Η εύρεση λοιπόν των διαδρομών και των συχνοτήτων που ελαχιστοποιούν το κόστος πραγματοποιείται με τη χρήση μιας αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία υπόκειται σε κάποιους περιορισμούς-υποθέσεις:

- Κάθε στάση λεωφορείου πρέπει να εξυπηρετείται μόνο από μια γραμμή λεωφορείου
- Κάθε γραμμή λεωφορείου πρέπει να συνδέεται με μόνο ένα σιδηροδρομικό σταθμό
- Κάθε λεωφορείο θεωρείται ότι σταματάει σε κάθε στάση κατά τη διαδρομή του
- Τα λεωφορεία έχουν συγκεκριμένες ταχύτητες λειτουργίας και χωρητικότητες, παρόλο ότι μπορούν να υπερφορτώνονται, σε κάποια όρια
- Κάθε διαδρομή λεωφορείου περιορίζεται από ένα μέγιστο επιτρεπτό μήκος
- Ο υπάρχον στόλος λεωφορείων θεωρείται χρησιμοποιήσιμος στο σύνολο του



Σχήμα 2.2: Δίκτυο και Συχνότητες μέσω του Ευριστικού Διαδοχικού Χτισίματος (Πηγή: Search strategies for the feeder bus network design problem, C.L. Martins, M.V. Pato 1996)

Μια διαφορετική περίπτωση εξέτασαν οι Chien, Young (1998) στο πρόβλημα σχεδιασμού τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείων σε μια τυπική αστική, ετερογενή ως προς τη ζήτηση περιοχή. Η μελέτη τους βασίζεται στην παραδοχή πως η ζήτηση διανέμεται ομοιόμορφα σε κάθε ζώνη της προς εξυπηρέτηση περιοχής, όμως διαφέρει ανάμεσα στις ζώνες και δεν είναι ευαίσθητη στην ποιότητα εξυπηρέτησης. Έτσι δημιούργησαν έναν αλγόριθμο για τον σχεδιασμό όχι ολόκληρου του δικτύου λεωφορείων, αλλά μεμονωμένων γραμμών που στοχεύει στην μεγιστοποίηση της χωρικής κάλυψης και της ζήτησης που συγκεντρώνεται στην περιοχή εξυπηρέτησης. Πιο συγκεκριμένα, οι παραδοχές που έγιναν προς απλοποίηση του προβλήματος στη δική τους αντικειμενική συνάρτηση, η οποία είχε ως στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους (επιβατών-συγκοινωνίας), ήταν:

- Η ετερογενής περιοχή με επίσης ανώμαλο οδικό δίκτυο χωρίζεται σε πολλές ορθογώνιες ζώνες σύμφωνα με την κατανομή της ζήτησης
- Την παροχή υπηρεσιών τροφοδότησης για την περιοχή την πραγματοποιεί ένα λεωφορειακό σύστημα με μια μόνο καθορισμένη διαδρομή. Έτσι το

μοτίβο της ζήτησης στην περιοχή είναι “many-to-one” στην πρωινή ώρα αιχμής και ‘’one-to-many” στην αντίστοιχη απογευματινή

- Η γραμμή μεταφοράς που συνδέει έναν σταθμό μεταφοράς και την περιοχή εξυπηρέτησης θεωρείται πως είναι συνεχής
- Η ζήτηση δεν είναι ευαίσθητη στην ποιότητα εξυπηρέτησης ή σε κάποιο κόστος και είναι ομοιόμορφα διανεμημένη σε κάθε ζώνη, άλλα διαφέρει μεταξύ ζωνών
- Τα λεωφορεία μπορούν να σταματήσουν οπουδήποτε στη διαδρομή, όταν απαιτείται επιβίβαση ή αποβίβαση από τους επιβάτες. Συνεπώς ο αριθμός και η τοποθεσία στάσεων λεωφορείων παραλείπεται
- Ο μέσος χρόνος αναμονής των επιβατών είναι ίσος με το μισό της διάρκειας κίνησης των λεωφορείων αν η κίνηση είναι ντετερμινιστική και οι αφίξεις επιβατών ακολουθούν την κατανομή Poisson
- Η χωρητικότητα των λεωφορείων θεωρείται πάντα επαρκής, έτσι το μέγεθος λεωφορείων δε λαμβάνεται υπόψη στη μελέτη

Αντίθετα με την προηγούμενη μελέτη, οι Jerby and Ceder (2006) επικεντρώθηκαν στην εύρεση μεθοδολογίας για τον σχεδιασμό ολόκληρου δικτύου λεωφορείων. Η δουλειά τους αποτελείται από τρία μέρη: α) τη δημιουργία μεθόδου για υπολογισμό της πιθανής ζήτησης σε μια υπηρεσία τροφοδοτικών λεωφορείων β) την ανάλυση ενός μοντέλου που επικεντρώνεται στον αυτόματο σχεδιασμό βέλτιστων διαδρομών και γ) τον καθορισμό ενός ευριστικού αλγόριθμου που θα λαμβάνει υπόψη τα οδικά δίκτυα όλων των μεγεθών. Όλη η εργασία βασίζεται σε μια λογική όπου το πρόβλημα θα χωρίζεται σε υπό-προβλήματα, Σε αυτή, τα πρώτα στάδια αφορούν την εύρεση της πιθανής ζήτησης, δημιουργώντας ένα βασικό δίκτυο της καθορισμένης περιοχής εξυπηρέτησης, χρησιμοποιώντας δεδομένα και περιορισμούς όπως τις μέσες ταχύτητες μετακίνησης, τον μέγιστο χρόνο ταξιδιού και τις προς περπάτημα αποστάσεις μετά από τη σάρωση όλου του αστικού δικτύου και την αφαίρεση όλων των διαδρομών που δε χρησιμοποιούνται από τις συγκοινωνίες. Τα επόμενα στάδια αφορούν την δημιουργία του μαθηματικού μοντέλου για την επίλυση του προβλήματος, που βασίζεται στις μεταβλητές απόφασης με στόχο την ελαχιστοποίηση των αποστάσεων με τα πόδια και τη μεγιστοποίηση της ζήτησης. Τα τελευταία στάδια της έρευνας επικεντρώνονται στον ευριστικό αλγόριθμο που θα καθορίσει τις κυκλικές διαδρομές στον αστικό ιστό, που θα ξεκινούν και θα τελειώνουν στην ίδια ζώνη, με συνολικό χρόνο ταξιδιού μικρότερο από τον ανώτερο δυνατό, σύμφωνα με τους περιορισμούς.

Στη μελέτη των Kuah, Perl (1988) και των Martins, Pato (1996) βασίστηκαν και οι Kuan et al (2005), τις οποίες ουσιαστικά εξέλιξαν σχεδιάζοντας καλύτερους αλγόριθμους για την επίλυση του FBNDP εξερευνώντας τη χρήση μεταευριστικών μεθόδων. Έτσι πρότειναν τις μεθόδους των γενετικών αλγόριθμων και της αποικίας μυρμηγκιών για την εύρεση των βέλτιστων αποτελεσμάτων. Στη μελέτη αυτή οι στόχοι της αντικειμενικής συνάρτησης αλλά και οι παραδοχές που γίνονται σε αυτή είναι ίδιες αυτές των παλαιότερων ερευνών. Για την λύση του προβλήματος λοιπόν, δημιουργήθηκε μια αρχική εφικτή λύση χρησιμοποιώντας ευριστική μέθοδο κατασκευής διαδρομών. Ύστερα χρησιμοποιήθηκαν οι δυο μεταευριστικές μέθοδοι για τη βελτίωση των αρχικών αποτελεσμάτων.

Στους δυο παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σύγκρισης των γνωστότερων μεταευριστικών μεθόδων, της Προσομοιωμένης Ανόπτησης (SA = Simulated Annealing), της Αναζήτησης με Ταμπού (TS = Tabu Search), των Γενετικών Αλγόριθμων (GA = Genetic Algorithm) και της Βελτιστοποίησης Αποικίας Μυρμηγκιών (ACO = Ant Colony Optimization). Τα στοιχεία του πίνακα καθιστούν φανερό πως κάθε μέθοδος έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και επιλογή κάθε φορά αυτής που επιλύει με καλύτερο τρόπο το πρόβλημα εξαρτάται από τα εκάστοτε δεδομένα του. Η μέθοδος της Αναζήτησης Ταμπού θα μπορούσε να αναφερθεί πως παρουσιάζει στο σύνολο της καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με το μικρότερο συνολικό κόστος, όμως σε πολλές περιπτώσεις απαιτεί περισσότερο υπολογιστικό χρόνο.

Πίνακας 2.1: Σύγκριση των καλύτερων συνολικών κοστών μέσω μεταευριστικών μεθόδων (Πηγή: Solving the feeder bus network design problem by genetic algorithms and ant colony optimization , S.N. Kuan, H.L. Ong, K.M. Ng 2005)

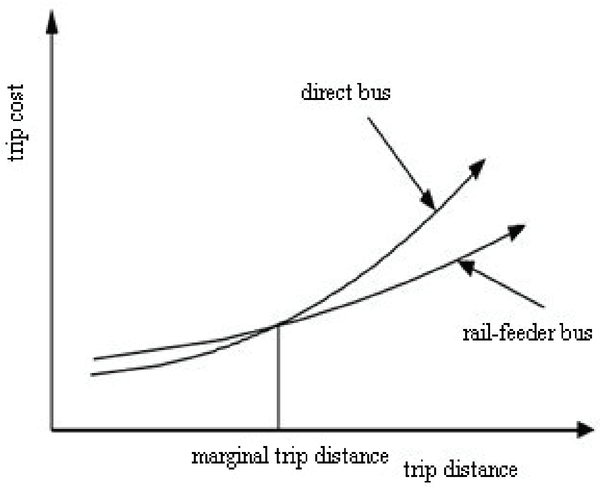
Problem	SA	TS with intensification	GA	ACO
Base	6520	6338	6412	6535
1	4462	4432	4447	4478
2	4581	4467	4546	4690
3	4686	4521	4576	4644
4	4413	4259	4381	4639
5	4195	4085	4111	4234
6	6749	6660	6786	6839
7	7576	7459	7599	7566
8	6773	6633	6707	6727
9	6113	5857	5992	5913
10	5951	5854	5904	5980
11	17297	17202	17503	17327
12	16636	16671	16768	16815
13	14548	14406	14611	14461
14	16326	16159	16547	16030
15	13938	13304	13684	14225
16	21134	21092	21316	21166
17	20001	19843	20634	20680
18	17944	17628	18178	18010
19	20299	20280	20964	21048
20	17270	16681	17065	17363

Πίνακας 2.2: Σύγκριση μέσων υπολογιστικών χρόνων μέσω μεταευριστικών μεθόδων (δευτερόλεπτα) (Πηγή: Solving the feeder bus network design problem by genetic algorithms and ant colony optimization, S.N. Kuan, H.L. Ong, K.M. Ng 2005)

Problem	SA	TS with intensification	GA	ACO
Base	4.6	13.8	10.1	9.0
1	5.1	4.1	5.5	5.0
2	6.9	4.3	4.7	7.4
3	5.8	4.0	5.8	6.0
4	5.1	3.5	5.7	6.1
5	4.3	4.0	4.8	4.7
6	6.5	11.5	9.5	9.6
7	7.7	10.3	8.7	10.9
8	6.6	8.8	7.7	10.0
9	6.2	12.1	10.3	8.5
10	6.2	9.8	9.3	9.2
11	89.9	147.5	127.5	113.6
12	86.0	137.4	105.6	92.8
13	87.1	84.9	76.8	103.8
14	88.2	120.0	127.3	109.8
15	78.9	93.0	87.4	97.3
16	108.7	250.0	167.4	131.8
17	109.5	196.5	148.9	120.9
18	91.3	150.5	127.8	107.2
19	111.9	223.3	163.2	139.8
20	88.6	152.6	144.2	110.4

Μια άλλη μελέτη πραγματοποίησαν οι Shrivastava, O'Mahony (2006), στην οποία οι διαδρομές των λεωφορείων και οι συχνότητες τους παράχθηκαν ταυτόχρονα, μέσω της χρήσης Γενετικών Αλγορίθμων, με τέτοιο τρόπο ώστε οι συχνότητες των λεωφορείων να συμβαδίζουν με τις αντίστοιχες των τρένων με σκοπό τα δυο μέσα να είναι συμπληρωματικά. Σε αυτή η αντικειμενική συνάρτηση έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους των επιβατών, που αποτελείται από το κόστος του χρόνου μέσα στο όχημα και το κόστος του χρόνου μεταφοράς μεταξύ του σταθμού μετρό και των λεωφορείων, και του κόστους των συγκοινωνιών, δηλαδή του κόστους λειτουργίας των λεωφορείων. Ακόμη οι περιορισμοί αφορούν στο μέγεθος του στόλου, στον συντελεστή φορτίου και στην ανικανοποίητη ζήτηση, ενώ τυχόν παραβίαση αυτών των περιορισμών προσθέτει διάφορες ποινές στην αντικειμενική συνάρτηση. Το μοντέλο αυτό των Shrivastava και O'Mahony δοκιμάστηκε σε μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε για το Δουβλίνο της Ιρλανδίας.

Οι Hu et al(2012), δίνουν τον ορισμό της οριακής απόστασης ταξιδιού (marginal trip distance), εξηγώντας πως, για διαδρομές μικρότερες της οριακής αυτής τιμής, το κόστος ταξιδιού από τη χρήση μόνο λεωφορείου για να φτάσει κάποιος στον προορισμό του, είναι μικρότερο από το αντίστοιχο κόστος του συνδυασμού λεωφορείου-Μετρό για τον ίδιο προορισμό.



Σχήμα 2.3: Σχέση μεταξύ κόστους ταξιδιού και απόστασης (Πηγή: A Model Layout Region Optimization for Feeder Buses of Rail Transit, Y. Hu, Q. Zhang, W. Wang 2012)

Έτσι, αναφέρουν πως καθώς το συμβατικό λεωφορείο είναι ευέλικτο και κατάλληλο για κοντινές διαδρομές με μεγάλη πυκνότητα, είναι προτιμότερο σε τέτοιες περιπτώσεις από τη μετακίνηση με τρένο, που είναι καταλληλότερο για μεγαλύτερες και πιο μακρινές μετακινήσεις. Η διαφορά της συγκεκριμένης μελέτης με τις προηγούμενες, είναι πως η ελαχιστοποίηση του κόστους που είναι ο στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης, περιλαμβάνει εκτός από το γενικευμένο κόστος ταξιδιού, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, και το επίπεδο άνεσης των επιβατών. Στη δική τους περίπτωση, επίσης, περιέλαβαν στη συνάρτηση τους και το κόστος του εισιτηρίου, καθώς στην περίπτωση που εξέτασαν, αυτή της πόλης Guangzhou της Κίνας, το εισιτήριο του Μετρό έχει διαφορετική τιμή από το εισιτήριο του λεωφορείου και εξαρτάται από την απόσταση που διανύεται με το Μετρό.

Μια άλλη έρευνα των Ciaffi et al (2012) ανέφερε τον σχεδιασμό τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείων σαν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που βασίζεται στην ελαχιστοποίηση των πόρων και του κόστους που σχετίζεται με τους επιβάτες και το σύστημα δημόσιων μεταφορών με σταθερή ζήτηση. Το κόστος χρηστών αναφέρεται στον χρόνο ταξιδιού, τον χρόνο πρόσβασης, τον χρόνο αναμονής και περιλαμβάνει ποινή σε σχέση με τη μετεπιβίβαση, ενώ το κόστος των υπηρεσιών μεταφορών σε έναν συνδυασμό της συνολικής απόστασης και του χρόνου ταξιδιού των λεωφορείων. Στην αντικειμενική συνάρτηση εισάγεται επίσης μια μεταβλητή που αναφέρεται σε ποινή που έχει να κάνει με την ανικανοποίητη ζήτηση του δικτύου. Στη μελέτη αυτή λοιπόν, η προτεινόμενη λύση αποτελείται από δυο στάδια:

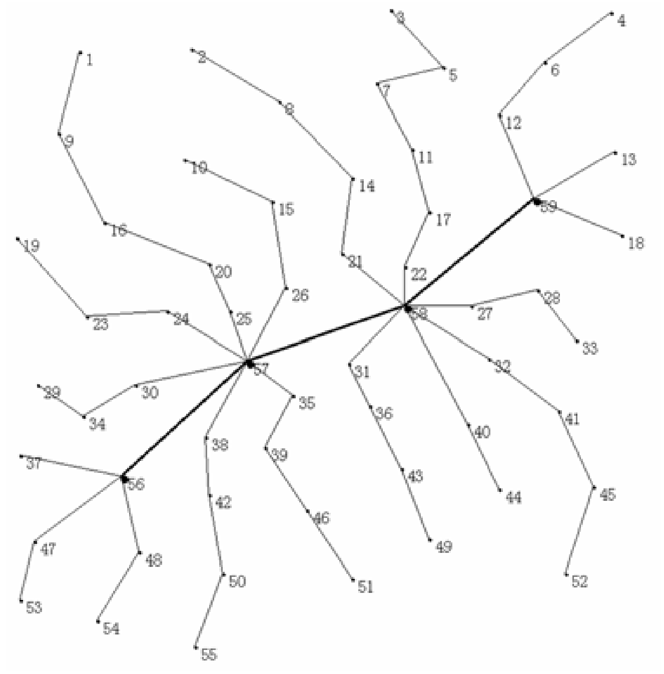
- Έναν ευριστικό αλγόριθμο παραγωγής διαδρομών που παράγει μεγάλα και λογικά σετ υλοποιήσιμων διαδρομών, εφαρμόζοντας διαφορετικά κριτήρια σχεδιασμού και πρακτικούς κανόνες. Ο αλγόριθμος λοιπόν παράγει δυο συμπληρωματικά σετ διαδρομών, το ένα με την τεχνική των k-συντομότερων διαδρομών (k-shortest path) και το άλλο με την τεχνική του περιοδεύοντος πωλητή (traveling salesman). Με τους τρόπους αυτούς διατηρείται μια ισορροπία μεταξύ αποτελεσματικότητας και βαθμού απόδοσης (από την πλευρά του συστήματος μεταφορών) και μεγιστοποίησης της περιοχής κάλυψης και της βελτίωσης της σύνδεσης μεταξύ δικτύων τρένων και λεωφορείων
- Έναν γενετικό αλγόριθμο που βρίσκει το βέλτιστο δίκτυο διαδρομών και συχνοτήτων. Τα σετ διαδρομών που αναπτύχθηκαν με τις προηγούμενες μεθόδους είναι η βάση από την οποία ο γενετικός αλγόριθμος επιλέγει ποιες διαδρομές θα απαρτίσουν το δίκτυο. Οι συχνότητες, που παίζουν βασικό

ρόλο στην απόδοση του συστήματος μεταφορών, βρίσκονται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας που λαμβάνει υπόψη τον αριθμό των επιβατών.

Τη μέθοδο αυτή επίλυσης του προβλήματος οι ερευνητές την έβαλαν σε εφαρμογή σε ένα υπαρκτό δίκτυο μεσαίου μεγέθους, αυτό μιας περιοχής της Ρώμης στην Ιταλία.

Η έρευνα των Deng et al (2013) είχε μια σημαντική διαφορά σε σχέση με τις προηγούμενες. Αυτή αφορά στο γεγονός ότι η ζήτηση δεν περιορίζεται μόνο στη μετακίνηση από πολλές αφετηρίες προς έναν σταθμό τρένου (M-to-1) αλλά αναφέρεται σε ένα πιο γενικευμένο μοντέλο όπου οι προορισμοί μπορεί να είναι ο οποιοσδήποτε από τους σταθμούς (M-to-M). Ακόμη τα λεωφορεία και το Μετρό θεωρούνται σαν ένα ενιαίο σύστημα μεταφορών. Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιείται γενετικός αλγόριθμος, με τον στόχο της συνάρτησης να είναι όπως και στις περισσότερες μελέτες η ελαχιστοποίηση του κόστους επιβατών και συγκοινωνίας και οι περιορισμοί είναι ακόμη παρόμοιοι με άλλων μελετών. Πιο συγκεκριμένα:

- Στο δίκτυο τροφοδοτικών λεωφορείων κάθε υπό-σύνολο στάσεων πρέπει να συνδέεται με σταθμούς Μετρό είτε απευθείας είτε μέσω άλλων στάσεων λεωφορείων
- Κάθε διαδρομή λεωφορείου πρέπει να συνδέεται με ένα σιδηροδρομικό σταθμό
- Κάθε διαδρομή λεωφορείου k πρέπει να σταματά σε κάθε στάση i μόνο μια φορά και κάθε στάση i πρέπει αν εξυπηρετείται μόνο από μια διαδρομή k
- Για κάθε διαδρομή, η συχνότητα λειτουργίας θα πρέπει να συμβαδίζει με τη χωρητικότητα των λεωφορείων



Σχήμα 2.4: Βέλτιστο δίκτυο τροφοδοτικών λεωφορείων με τη ζήτηση σε μορφή (M-to-M) (Πηγή: Optimal design of feeder-bus network related to urban rail line based on transfer system, L. Deng, W. Gao, W. Zhou, T. Lai 2013)

2.4 ΑΝΤΑΠΟΚΡΙΝΟΜΕΝΗ ΣΤΗ ΖΗΤΗΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ

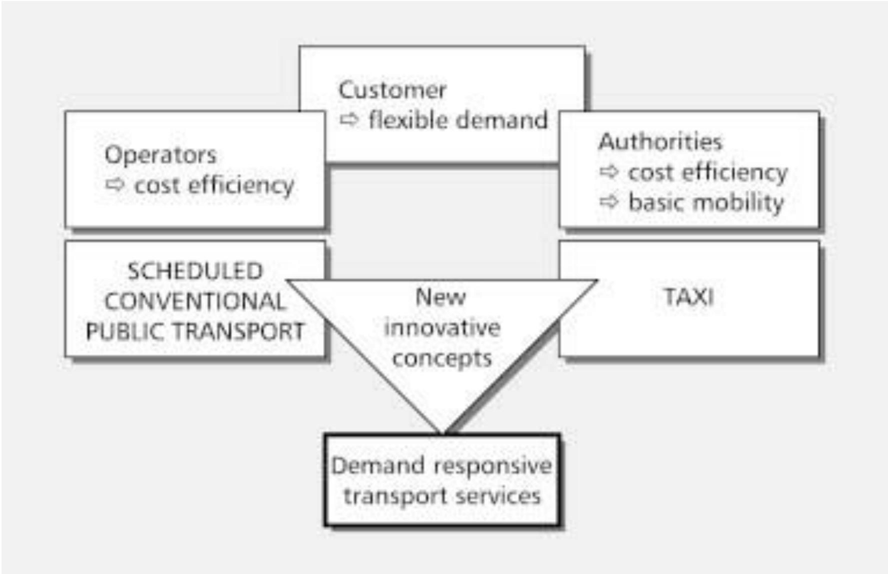
2.4.1 Εισαγωγή

Στη σημερινή εποχή κυρίαρχο ρόλο για τη μετακίνηση των ανθρώπων στις πόλεις παίζουν τα ιδιωτικά οχήματα κάθε ατόμου και οι δημόσιες συγκοινωνίες. Οι δυο αυτοί τρόποι μετακίνησης αποτελούν δυο εντελώς διαφορετικές όψεις στην κινητικότητα στις πόλεις. Από τη μια το κάθε άτομο με τη χρήση των οχημάτων του μπορεί να επιλέξει το πότε και προς τα που ακριβώς θα πραγματοποιήσει μια μετακίνηση, σε αντίθεση με τις δημόσιες συγκοινωνίες όπου οι προορισμοί αλλά και οι ώρες πραγματοποίησης κάθε διαδρομής είναι προκαθορισμένοι. Αυτό το κενό ανάμεσα στις μετακινήσεις με ιδιωτικά και δημόσια μέσα καλύπτει η «Ανταποκρινόμενη στη ζήτηση Μεταφορά» (Demand Responsive Transport- DRT). Από τη δεκαετία του 1970, το DRT έχει καθιερωθεί ως μια λύση στις μετακινήσεις όπου άλλοι τρόποι μετακίνησης δεν είναι συμφέροντες, παρόλο που δεν είναι παρά τα τελευταία χρόνια με την εξέλιξη της τεχνολογίας που η μέθοδος αυτή αποκτά ευρεία αποδοχή.

2.4.2 Ορισμός

Η λειτουργία της «Ανταποκρινόμενης στη ζήτηση Μεταφοράς» αναφέρεται στην ουσία σε μια μεγαλύτερη ευελιξία στην κίνηση των οχημάτων, κυρίως αστικών αλλά και ιδιωτικών, σε αντίθεση με τις δημόσιες συγκοινωνίες που χαρακτηρίζονται από τη μεγάλη ανελαστικότητα τους. Πιο συγκεκριμένα, για να θεωρηθεί ένα σύστημα μεταφορών ως «DRT» θα πρέπει να ισχύουν κάποιες από τις παρακάτω προϋποθέσεις [(Davison et al (2013), Scottish Executive Social Research (2006)]:

- Η υπηρεσία θα πρέπει να είναι διαθέσιμη στο ευρύ κοινό
- Η υπηρεσία θα πρέπει να διατίθεται από μικρής χωρητικότητας οχήματα όπως μικρά λεωφορεία, βαν ή ταξί
- Η υπηρεσία θα πρέπει να αντιδρά σε αλλαγές της ζήτησης για αυτή είτε μεταβάλλοντας τη διαδρομή που θα πραγματοποιεί είτε τις ώρες των δρομολογίων της
- Το κόμιστρο πρέπει να χρεώνεται ανά επιβάτη και όχι ανά όχημα
- Για τη χρήση της υπηρεσίας πρέπει να πραγματοποιείται κράτηση εκ των προτέρων και διαδρομές πραγματοποιούνται μόνο όταν υπάρχει ζήτηση. Αυτές οι μορφές μεταφοράς περιλαμβάνουν υπηρεσίες όπως μεταφορές από και προς τα αεροδρόμια, μεταφορές ασθενών, σχολικές μεταφορές, αλλά και τις υπηρεσίες «dial-a-ride» και «ring-and-ride»
- Η υπηρεσία λειτουργεί με καθορισμένα δρομολόγια εκτός αν άτομα πραγματοποιούν κρατήσεις εκ των προτέρων και έτσι γίνονται κάποιες αλλαγές σε αυτά για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες τους. Η ελαστικότητα στα δρομολόγια είναι δυνατόν να απαιτείται συγκεκριμένες ώρες της ημέρας ή και συγκεκριμένες ημέρες της εβδομάδας.



Σχήμα 2.5: Η δημιουργία του DRT (Πηγή: Demand Responsive Transport Services: Towards the Flexible Mobility Agency, G. Ambrosino, J.D. Nelson, M. Romanazzo)

Παρότι η ιδέα της «Ανταποκρινόμενης στη ζήτηση Μεταφοράς» ξεκίνησε από τη δεκαετία του 1970, η συστηματική ανάλυση και η διάδοση της πραγματοποιήθηκε αρκετά χρόνια μετά, και συνεχίζεται και στις μέρες μας. Αυτό δικαιολογείται από δυο σημαντικά μέρη:

- Πραγματοποιήθηκαν πολλές άμεσες τεχνολογικές βελτιώσεις στην υπηρεσία του DRT τα τελευταία χρόνια, όσο αναφορά για παράδειγμα τα λογισμικά χωρικής αλλά και χρονικής δρομολόγησης. Ακόμη στην εξάπλωση της υπηρεσίας βοήθησε η ευρεία χρήση των κινητών που επιτρέπουν τη σύνδεση στο διαδίκτυο (smartphones). Αυτά σημαίνουν ότι η υπηρεσία DRT είναι πλέον πολύ πιο αποδοτική σε σχέση με παλαιότερα χρόνια.
- Παρότι στη σημερινή εποχή η χρήση των Ι.Χ. για τις μετακινήσεις των πολιτών κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα, ο τρόπος που δομούνται οι πόλεις ενθαρρύνει την χρήση των δημόσιων συγκοινωνιών και με την πάροδο του χρόνου αυτές γίνονται όλο και πιο αποδοτικές. Έτσι η χρήση των υπηρεσιών DRT βοηθάει στη βελτίωση των αστικών συγκοινωνιών και στην όλο και μεγαλύτερη χρήση τους από τους πολίτες.

2.4.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο πανεπιστήμιο Berkley της Καλιφόρνια από τους Li et al (2007), μελετά τη σκοπιμότητα της εφαρμογής υπηρεσιών DRT για περιπτώσεις όπου υπάρχει χαμηλή ζήτηση, με την περιοχή μελέτης να αποτελείται από δυο πόλεις της Καλιφόρνια, το Fremont και το Newark. Στη μελέτη τους, αρχικά αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του υπάρχοντος δικτύου λεωφορείων και για την εύρεση κατάλληλων περιοχών για την εφαρμογή υπηρεσιών «checkpoint» DRT. Ύστερα διαμορφώθηκε μια στρατηγική για την εφαρμογή του DRT αλλά και για αυτόματη κράτηση εισιτηρίων και συστήματος προγραμματισμού δρομολογίων. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν πως με ελάχιστες αλλαγές στις ήδη καθορισμένες διαδρομές των λεωφορείων και με τη χρησιμοποίηση της παραπάνω μεθόδου, υπάρχει μεγάλη βελτίωση στην εξυπηρέτηση των επιβατών, στην αξιοπιστία του συστήματος και μείωση στο κόστος λειτουργίας των υπηρεσιών.

Μια άλλη μεγάλη μελέτη πραγματοποιήθηκε στη Μεγάλη Βρετανία από τους Davison et al (2013), στην οποία εξετάστηκαν οι ήδη υπάρχουσες υπηρεσίες DRT ώστε να ανακαλυφθεί ποιες δουλεύουν καλά και γιατί. Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκε ο σχεδιασμός, η απόδοση και οι μελλοντικές προοπτικές των υπηρεσιών αυτών που υπάρχουν στη Μεγάλη Βρετανία. Η έρευνα έδειξε αύξηση των υπηρεσιών αυτών από τον ιδιωτικό τομέα, κατά κύριο λόγο με τη χρήση σχετικά μικρών οχημάτων. Ακόμη, ο αριθμός των επιβατών επηρεάζεται από το μέγεθος των οχημάτων και από τη χρήση μικρών οχημάτων, ειδικά στις αγροτικές περιοχές. Τέλος, παρόλο που αναδεικνύεται η μεγάλη ανάγκη για τη χρήση των υπηρεσιών αυτών, ειδικά για την επαρκή γεωγραφική κάλυψη όλων των περιοχών, παρατηρείται μια δυσκολία στην πλήρη εφαρμογή τους. Αυτό συμβαίνει κυρίως επειδή δεν έχει αποδειχθεί πλήρως η οικονομική βιωσιμότητα των τεχνικών αυτών. Έτσι το πρόβλημα έγκειται στην ανεπαρκή χορήγηση κεφαλαίων για την ανάπτυξη των υπηρεσιών αυτών, με τη λειτουργία τους να περιορίζεται συνήθως στην αντικατάσταση συμβατικών γραμμών λεωφορείων, λόγω του ότι για τοπικές ανάγκες το DRT αποτελεί πιο αποτελεσματικό σύστημα.

Μια παρόμοια έρευνα πραγματοποιήθηκε από τους Laws et al (2009)με περιοχή μελέτης την Αγγλία και την Ουαλία, η οποία αναφέρει πως παρόλο που λειτουργούν αρκετές υπηρεσίες DRT στη Μεγάλη Βρετανία, κυρίως λόγω της αύξησης των κρατικών επιχορηγήσεων, δεν έχει πραγματοποιηθεί αρκετή έρευνα όσον αφορά στις αποδόσεις αυτών των συστημάτων. Έτσι στη μελέτη τους αναζήτησαν στοιχεία για το πώς και γιατί αναπτύχθηκαν οι υπηρεσίες αυτές, συλλέγοντας δεδομένα για τον σχεδιασμό και τη λειτουργία τους, για τον σκοπό που λειτουργεί καθένα από αυτά και αξιολόγησαν την απόδοση τους και τις μελλοντικές δυνατότητες τους. Τα αποτελέσματα της έρευνας τους έδειξαν πως οι «Demand Responsive Transport» υπηρεσίες κατά κύριο λόγο δημιουργήθηκαν για να αντιμετωπίσουν προβλήματα που υπήρχαν λόγω της έλλειψης προσβασιμότητας σε πολλά σημεία αστικών και μη περιοχών και πως τους πήρε αρκετό χρόνο για να καθιερωθούν, και να επιτύχουν τους στόχους τους. Η έρευνα καταλήγει στο ότι τα συστήματα DRT αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στο μέλλον άλλα χρειάζεται αρκετή έρευνα επί των ήδη υπαρχόντων συστημάτων ώστε τα μελλοντικά να μην αντιμετωπίζουν τα ίδια προβλήματα.

Οι Brake et al (2007) στη δική τους μελέτη εστιάζουν στις ευέλικτες υπηρεσίες μεταφορών, δίνοντας κάποιες κατευθυντήριες γραμμές για την εφαρμογή των συστημάτων αυτών. Αρχικά, ορίζουν τα ευέλικτα συστήματα μεταφορών στο πλαίσιο του συνολικού συστήματος μεταφορών και δίνουν κάποια παραδείγματα πρόσφατων και μελλοντικών εφαρμογών τους. Ύστερα καθορίζουν κάποια κύρια σημεία σχετικά με την επιτυχή εφαρμογή των συστημάτων, όπως για παράδειγμα το πλαίσιο λήψης αποφάσεων όσον αφορά στη βιωσιμότητα των συστημάτων, τις τεχνολογίες που εφαρμόζονται για τη λειτουργία και το σχεδιασμό τους και τη σημασία του σωστού marketing και προώθησης στις υπηρεσίες. Τέλος, αναλύοντας κάποια πραγματικά παραδείγματα εφαρμογής των υπηρεσιών, παραθέτουν κάποια βασικά συμπεράσματα που απορρέουν από αυτά.

Την εκτενέστερη ίσως έρευνα στα συστήματα DRT πραγματοποίησαν οι Ambrosino et al (2003), στο σύγγραμμα τους με τίτλο «Demand Responsive Transport Services: Towards the Flexible Mobility Agency». Στο βιβλίο τους αυτό αναφέρουν πως στη σύγχρονη εποχή παρόλη την εξέλιξη των δημόσιων συγκοινωνιών, τα προβλήματα που αφορούν την κίνηση στους δρόμους, την κατανάλωση ενέργειας και το περιβάλλον, αντί να μειώνονται αυξάνονται. Συνεπώς απαιτούνται πιο επαναστατικές μέθοδοι για την αντιμετώπιση τους. Μια από αυτές είναι η ανάδειξη των ευέλικτων συστημάτων μεταφορών σε ενεργά στοιχεία της συνολικής δημόσιας συγκοινωνίας. Σύμφωνα με τη μελέτη, υπάρχει μια αυξανόμενη ανάγκη για καλύτερη εξυπηρέτηση των συγκοινωνιών σε περιοχές με χαμηλή ζήτηση, όπου τις περισσότερες φορές τα υπάρχοντα συστήματα δεν καλύπτουν επαρκώς την ανάγκη για μετακίνηση. Οι περιπτώσεις αυτές παρουσιάζουν πολλά περιθώρια βελτίωσης και ένας από τους τρόπους που μπορεί να επιτευχθεί είναι με την εφαρμογή συστημάτων DRT στις περιοχές αυτές. Στο σύγγραμμα αυτό λοιπόν ερευνούνται οι υπηρεσίες αυτές, ως προς τους λόγους που γίνονται όλο και πιο διαδεδομένες, τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στην ανάπτυξη και τη λειτουργία τους, τους τρόπους που μπορούν να εφαρμοστούν, τα οφέλη που μπορούν να αποφέρουν και τις πολλές μελλοντικές προοπτικές που παρουσιάζουν.

Κλείνοντας, είναι φανερό πως έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες στο πρόβλημα σχεδιασμού τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείων και έχουν ακολουθηθεί πολλές διαφορετικές μεθοδολογίες για την επίλυση του. Παρακάτω παρατίθεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τις κυριότερες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στο FBNDP.

Έτος	Συγγραφείς	Αντικειμενική Συνάρτηση	Μεταβλητές Απόφασης	Περιορισμοί	Μεθοδολογία	Ζήτηση	Δομή Ζήτησης	Εφαρμογή
1988	G.K. Kuah, J. Perl	Κόστος Επιβατών, Κόστος Φορέων	Γραμμές, Συχνότητες, Στάσεις	Ώρα αιχμής, Επιβάτες επιλέγουν κοντινότερη στάση, Λεωφορεία σταματούν σε κάθε στάση, Αποστάσεις διαδρομών λεωφορείων, στάσεων, σταθμών τρένων θεωρούνται μικρές	Ευριστική (Sequential savings)	Ανελαστική	Πολλά προς Πολλά	Τυχαία δεδομένα μέσω Υπολογιστή
1996	C.L. Martins, M.V. Pato	Κόστος Επιβατών, Κόστος Φορέων	Γραμμές, Συχνότητες	Κάθε στάση μόνο από μια γραμμή λεωφορείου, κάθε γραμμή συνδέεται μόνο με ένα σιδηροδρομικό σταθμό, λεωφορεία σταματούν σε κάθε στάση, ταχύτητες και χωρητικότητες καθορισμένες, μέγιστο μήκος διαδρομής, ο στόλος χρησιμοποιείται στο σύνολο	Ευριστική (Sequential savings και two-phase)	Ανελαστική	Πολλά προς Ένα	Τυχαία δεδομένα μέσω Υπολογιστή
1998	S. Chien, Z. Young	Κόστος Επιβατών, Κόστος Φορέων	Μεμονωμένες γραμμές	Περιοχή και δίκτυο χωρίζονται σε ορθογώνιες ζώνες, δομή ζήτησης πολλά-σε-ένα πρωί και ένα-σε-πολλά απόγευμα, γραμμή μεταφοράς συνεχής, ζήτηση ομοιόμορφα σε κάθε ζώνη αλλά διαφορετική μεταξύ ζωνών, λεωφορεία σταματούν παντού, χωρητικότητα επαρκής	Μεταευριστική (GA)	Ανελαστική	Πολλά προς Ένα	Τυχαία δεδομένα μέσω Υπολογιστή
2006	Jerby S., Ceder A.	Ζήτηση, Αποστάσεις με τα πόδια	Γραμμές	Μέσες ταχύτητες μετακίνησης, μέγιστος χρόνος ταξιδιού	Μεταευριστική (GA)	Ανελαστική	Πολλά προς Ένα	Τυχαία δεδομένα μέσω Υπολογιστή

2005	S.N. Kuan, H.L. Ong, K.M. Ng	Κόστος Επιβατών, Κόστος Φορέων	Γραμμές, Συχνότητες	Κάθε στάση μόνο από μια γραμμή λεωφορείου, κάθε γραμμή συνδέεται μόνο με ένα σιδηροδρομικό σταθμό, λεωφορεία σταματούν σε κάθε στάση, ταχύτητες και χωρητικότητες καθορισμένες, μέγιστο μήκος διαδρομής, ο στόλος χρησιμοποιείται στο σύνολο	Μεταευριστική (GA,ACO)	Ανελαστική	Πολλά προς Ένα	Τυχαία δεδομένα μέσω Υπολογιστή
2006	P. Shrivastava, M. O'Mahony	Κόστος Επιβατών	Γραμμές, Συχνότητες	Μέγεθος στόλου, συντελεστής φορτίου, ανικανοποίητη ζήτηση	Μεταευριστική (GA)	Ανελαστική	Πολλά προς Ένα	Δουβλίνο
2012	Y. Hu, Q. Zhang, W. Wang	Κόστος Επιβατών, Κόστος Φορέων, Άνεση Επιβατών	Γραμμές, Συχνότητες	Ταχύτητες καθορισμένες, κόστος εισιτηρίου	Μεταευριστική (GA)	Ανελαστική	Πολλά προς Ένα	Guangzhou
2012	F. Ciaffi, E. Cipriani, M. Petrelli	Κόστος Επιβατών, Κόστος Φορέων	Γραμμές, Συχνότητες	Χωρητικότητα, μήκος διαδρομής, ανικανοποίητη ζήτηση	Ευριστική (k-shortest path, traveling salesman) Μεταευριστική (GA)	Ανελαστική	Πολλά προς Πολλά	Ρώμη
2013	L. Deng, W. Gao, W. Zhou, T. Lai	Κόστος Επιβατών, Κόστος Φορέων	Γραμμές, Συχνότητες	Κάθε στάση και κάθε διαδρομή συνδέεται με σταθμό τρένου, κάθε διαδρομή σταματά μια φορά σε κάθε στάση και κάθε στάση εξυπηρετείται από μόνο μια διαδρομή, συχνότητα συμβαδίζει με χωρητικότητα	Μεταευριστική (GA)	Ανελαστική	Πολλά προς Πολλά	Τυχαία δεδομένα μέσω Υπολογιστή

Πίνακας 2.3: Συγκεντρωτική Παρουσίαση ερευνών στο FBNDP

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην τρίτη ενότητα της εργασίας θα πραγματοποιηθεί ανάλυση του μαθηματικού προτύπου και θα διατυπωθεί η αντικειμενική συνάρτηση που εκφράζει το πρόβλημα και οι επιβαλλόμενοι περιορισμοί σε αυτή. Ακόμη, θα περιγραφούν τα μεθοδολογικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του προβλήματος με κυρίως με μια εκτενή αναφορά στους γενετικούς αλγόριθμους, που αποτελούν το μοντέλο με το οποίο πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση. Τέλος, περιγράφεται συγκεκριμένα ο γενετικός αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος μας.

3.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ

Το πρόβλημα του βέλτιστου σχεδιασμού δικτύου τροφοδοτικών γραμμών θα επιλυθεί με τη χρησιμοποίηση ακέραιου, μη γραμμικού προγραμματισμού. Συνεπώς είναι απαραίτητο να διατυπωθεί το μαθηματικό πρότυπο, το οποίο αναφέρεται στην αντικειμενική συνάρτηση η οποία θα μετράει το συνολικό κόστος του δικτύου και θα αποτελέσει την προς βελτιστοποίηση μεταβλητή και στους επιπρόσθετους περιορισμούς που θα επιβληθούν σε αυτή.

3.2.1 Αντικειμενική Συνάρτηση

Για τη μαθηματική προτυποποίηση του προβλήματος είναι αναγκαίο να ορίσουμε ένα σύνολο κόμβων C με πλήθος 15, που αντιπροσωπεύουν τις στάσεις του δικτύου, και ένα σύνολο ακμών E. Η κάθε ακμή ορίζεται μονοσήμαντα από ένα διατεταγμένο ζεύγος (i, j) όπου $i, j \in V, i \neq j$. Για κάθε ακμή (i, j) αντιστοιχεί ένα συγκεκριμένο κόστος c_{ij} το οποίο αντιπροσωπεύει το κόστος της διαδρομής του λεωφορείου για την συγκεκριμένη ακμή.

Το πρόβλημα συνεπώς διατυπώνεται μαθηματικά ως εξής:

$$min \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} \sum_{k \in W} C_{ijk} X_{ijk} + \sum_{j \in C} \sum_{k \in W} X_{0jk} + \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} U_{ip} \qquad (3.1)$$

$$\sum_{i \notin H} \sum_{j \in H} \sum_{k=1}^{K} X_{ijk} \geq 1 \qquad , \qquad for\ all\ H \qquad (3.2)$$

$$\sum_{i=1}^{I} \sum_{p=I+1}^{I+P} X_{ipk} = 1 \qquad , k = 1, \dots, K \quad , \forall p \in P \qquad (3.3)$$

$$\sum_{i=I+1}^{I+P} \sum_{p=1}^{I+P} X_{ipk} = 0 \qquad , k = 1, \dots, K \quad , \forall p \in P \qquad (3.4)$$

$$\sum_{i=1}^{I} \sum_{p=1}^{I+P} X_{ipk} \geq 1 \qquad , k = 1, \dots, K \quad , \forall p \in P \qquad (3.5)$$

$$\sum_{i=1}^{I} \sum_{p=I+1}^{I+P} d_{ip} \times \sum_{j=1}^{I+J} X_{ijk} \leq Q_k \qquad , k = 1, \dots, K \quad , \forall p \in P \qquad (3.6)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in H} U_{ijk} \rightarrow 0 \qquad (3.7)$$

$$\sum_{k=1}^{K} \sum_{j=1}^{I+P} X_{ijk} = P \qquad , i = 1, \dots, I \qquad (3.8)$$

$$\sum_{j=1}^{I+P} X_{ijk} - \sum_{m=1}^{I} X_{mik} \geq 0 \qquad , i \notin N, k = 1, \dots, K \qquad (3.9)$$

Όπου:

- C_{ijk} : το κόστος που αντιστοιχεί στο τόξο ij για το λεωφορείο k
- $X_{ijk} = 1$: αν ο σύνδεσμος ij βρίσκεται στη διαδρομή του λεωφορείου k, αλλιώς 0
- X_{0jk} : Συνολικός αριθμός διαδρομών
- U_{ip} : ο αριθμός των επιβατών που δεν εξυπηρετούνται από την στάση i προς τον σταθμό μετρό p

- I : το σύνολο των κόμβων i
- W : το σύνολο των λεωφορείων k
- N : Υποσύνολο των κόμβων I με ανικανοποίητη ζήτηση , $N \subseteq I$
- P : Σύνολο σταθμών μετρό p
- $C = I \cup P$
- $H \subseteq C$ περιλαμβανόμενου του P
- k λεωφορείο που ανήκει στο W
- d_{ip} η ζήτηση από τον κόμβο i προς τον σταθμό μετρό p
- Q_k η χωρητικότητα για λεωφορείο k

Η συνάρτηση (3.1) αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, στόχος της οποίας είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους για το δίκτυο, το οποίο αποτελείται από το άθροισμα τριών παραμέτρων. Οι παράμετροι αυτοί είναι:

1) Συνολικός Χρόνος Μετακίνησης (χρόνος ταξιδιού). Οι επιβάτες επιθυμούν να μετακινηθούν στον μικρότερο δυνατό χρόνο, αποφεύγοντας μεγάλες καθυστερήσεις που προκαλούν ταλαιπωρία.
2) Συνολικός αριθμός Διαδρομών. Στόχος των συγκοινωνιακών φορέων είναι όπως αναφέρθηκε παραπάνω η εξυπηρέτηση της ζήτησης, με όσο το δυνατόν όμως λιγότερες διαδρομές, ώστε να περιοριστούν τα λειτουργικά έξοδα.
3) Ανικανοποίητη Ζήτηση. Βασικός στόχος των συγκοινωνιών είναι η ικανοποίηση της ζήτησης για μετακίνησης, οπότε είναι προφανές πως η ανικανοποίητη ζήτηση θα πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή, αν όχι μηδενική.

3.2.2 Περιορισμοί

1) Οι εξισώση (3.2) αποτελεί περιορισμό που αναφέρει πως κάθε υποσύνολο του συνόλου των στάσεων πρέπει να συνδέεται με έναν σταθμό μετρό
2) Ο περιορισμός (3.3) ορίζει πως κάθε στάση λεωφορείου με έναν μόνο σταθμό μετρό

3) Η εξίσωση (3.4) εξασφαλίζει πως κάθε διαδρομή καταλήγει σε έναν σταθμό μετρό
4) Η εξίσωση (3.5) αποτελεί περιορισμό που ορίζει πως κάθε διαδρομή περιλαμβάνει τουλάχιστον μία στάση λεωφορείου και έναν σταθμό μετρό
5) Ο περιορισμός (3.6) αναφέρει πως ο συνολικός αριθμός των επιβατών κάθε λεωφορείου δεν υπερβαίνει τη χωρητικότητα
6) Ο περιορισμός (3.7) υποδεικνύει πως η ανικανοποίητη ζήτηση πρέπει να τείνει προς το μηδέν
7) Η εξίσωση (3.8) εξασφαλίζει πως κάθε στάση λεωφορείου συνδέεται με όλους τους σταθμούς μετρό μέσω διαφορετικών διαδρομών για τον κάθε ένα
8) Ο περιορισμός (3.9) δείχνει πως κάθε διαδρομή λεωφορείου του βασικού δικτύου είναι μη κυκλική διαδρομή
9) Τα λεωφορεία έχουν σταθερές ταχύτητες λειτουργίας και χωρητικότητες
10) Οι στάσεις του τρένου θεωρούνται προκαθορισμένες και δεν αλλάζουν
11) Η ζήτηση είναι προκαθορισμένη και είναι όλη προς τους σταθμούς του Μετρό

3.3 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Για την υλοποίηση του μοντέλου με το οποίο θα επιλυθεί το πρόβλημα της κατασκευής δικτύου τροφοδοτικών λεωφορείων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Microsoft Excel. Πιο συγκεκριμένα κατέστη αναγκαίο για την εργασία να προγραμματιστούν ειδικές συναρτήσεις που θα υπολογίζουν όλες τις απαραίτητες μεταβλητές για την εύρεση του τελικού αποτελέσματος. Αυτές οι συναρτήσεις δημιουργήθηκαν μέσω του λογισμικού Visual Basic for Applications (VBA) σε περιβάλλον Microsoft Excel.

Η γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic αποτελεί την πλέον διαδεδομένη υλοποίηση μιας αντικειμενοστραφούς γλώσσας προγραμματισμού σε περιβάλλον MS-Windows. Ακόμη, αποτελεί μέλος της ομάδας προγραμμάτων του Microsoft®

Visual Studio και τη μετεξέλιξη της παλαιότερης έκδοσής της με το όνομα GW Basic. Είναι μια πλούσια γλώσσα προγραμματισμού, με την κύρια διαφοροποίηση της από τις άλλες γλώσσες υψηλού επιπέδου προγραμματισμού να έγκειται στο ολοκληρωμένο περιβάλλον αναπτύξεως λογισμικού που παρέχει και επιτρέπει τη γραφική σύνθεση διαφόρων στοιχείων που αποτελούν μέσο επικοινωνίας με τον χρήστη του τελικού προγράμματος. Με τον όρο γλώσσα υψηλού επιπέδου προγραμματισμού εννοείται μια γλώσσα προγραμματισμού με αριθμητικά και γλωσσικά στοιχεία συνηθισμένα σε επιστήμονες και τεχνικούς, η οποία επιτρέπει εύκολα τη δημιουργία προγραμμάτων και εφαρμογών χωρίς την απαίτηση γνώσης της εσωτερικής δομής και λειτουργίας του υπολογιστή. Το όνομα της γλώσσας αυτής προέρχεται από το Visual (Οπτική) BASIC (Beginners All Purpose Symbolic Instruction Code), που όπως υποδεικνύουν και τα αρχικά της δίνει τη δυνατότητα για συγγραφή κώδικα για κάθε χρήση, από όχι απαραίτητα επαγγελματίες προγραμματιστές. Είναι ακόμη πολύ χρήσιμη στην έκφραση μαθηματικών τύπων και στον χειρισμό συμβολοσειρών.

Στη συγκεκριμένη μελέτη, χρησιμοποιείται η Visual Basic for Applications (VBA) η οποία ουσιαστικά αποτελεί μια εξειδικευμένη μορφή της Microsoft Visual Basic. Δημιουργήθηκε με βάση την γνωστή Visual Basic και χρησιμοποιεί πληθώρα ίδιων ή παρόμοιων χαρακτηριστικών και παρόμοιο σχεδιαστικό περιβάλλον. Η VBA δεν υπάρχει σαν ξεχωριστό λογισμικό, αλλά είναι ενσωματωμένη σε άλλα προγράμματα όπως MSOffice, Star Office, AutoCAD, MicroStation κτλ. Κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται για την αυτοματοποίηση κάποιων διαδικασιών (ή την προσθήκη κάποιων) οι οποίες συνήθως είναι λειτουργίες που χρησιμεύουν στο συγκεκριμένο κάθε φορά πρόβλημα. Συνεπώς, η βασική λειτουργία της VBA, και ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος, είναι η δυνατότητα να κατασκευαστούν κάθε φορά συναρτήσεις οι οποίες δεν υπάρχουν εκ των προτέρων, αλλά δημιουργούνται από τον χρήστη (User Defined Functions – UDFs). Για να κατασκευαστεί μια τέτοια συνάρτηση, απαιτείται να καθοριστούν από το χρήστη:

- Το όνομα της συνάρτησης, με το οποίο η συνάρτηση θα καλείται κάθε φορά στο εκάστοτε φύλλο εργασίας.

- Τα ορίσματα της συνάρτησης τα οποία πρακτικά αποτελούν τις μεταβλητές εισόδου της. Ως όρισμα μπορεί να εισαχθεί όχι μόνο μεμονωμένη τιμή, αλλά και ολόκληρη περιοχή κελιών (range). Επιπλέον, είναι απαραίτητο να καθοριστεί το είδος των μεταβλητών εισόδου: integer, single, double, string κ.λπ..
- Ο κώδικας της συνάρτησης, που θα υποδεικνύει τι ενέργειες θα εκτελεί η συνάρτηση κάθε φορά που θα καλείται. Συνίσταται οι μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν στον κώδικα να δηλώνονται στην αρχή αυτού, όπως επίσης και το είδος αυτών.

3.4 ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

3.4.1 Εισαγωγή

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι αποτελούν ένα σύστημα επίλυσης προβλημάτων αναζήτησης και βελτιστοποίησης, βασισμένο στις αρχές της Φυσικής Εξέλιξης. Οι αλγόριθμοι αυτοί ανήκουν στην κατηγορία των εξελικτικών αλγόριθμων, που με τη σειρά τους ανήκουν στους Μεταευρετικούς αλγόριθμους. Πλέον είναι ευρέως διαδεδομένοι κυρίως λόγω του στοχαστικού χαρακτήρα που ακολουθούν κατά την επαναληπτική διαδικασία που πραγματοποιούν για την εύρεση της βέλτιστης λύσης στο εκάστοτε πρόβλημα.

Παρόλο που η πρώτη εμφάνιση των Γενετικών Αλγορίθμων (Γ.Α.) πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 1950, έπρεπε να περάσουν αρκετά χρόνια για τη συστηματική ανάπτυξη τους, συγκεκριμένα από τον John Holland και τους συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο του Michigan (1975). Ο στόχος του Holland κατά την έρευνα του δεν ήταν αρχικά ο σχεδιασμός αλγόριθμου επίλυσης προβλημάτων αλλά η συστηματική μελέτη της διαδικασίας της φυσικής προσαρμογής και η σχεδίαση λογισμικού που διατηρεί τους σημαντικότερους από τους μηχανισμούς φυσικών συστημάτων. Στο βιβλίο του «Adaptation in Natural and Artificial Systems» (Holland 1975), περιέγραψε τους Γενετικούς Αλγορίθμους ως απλοποιημένη εκδοχή της βιολογικής εξέλιξης.

Η κεντρική ιδέα των Γ.Α. λοιπόν προέρχεται από τη θεωρία της Εξέλιξης (Evolution) του Δαρβίνου, κατά την οποία ένας αρχικός πληθυσμός ατόμων εξελίσσεται σε έναν νέο πληθυσμό, μέσω των διαδικασιών της «Φυσικής Επιλογής» και των «Γενετικών Τελεστών» (Γεωργόπουλος και Λυκοθανάσης, 1999). Έτσι λοιπόν η ορολογία των Γ.Α. προέρχεται από τον χώρο της Φυσικής Γενετικής. Σε αυτούς αναφέρονται τα άτομα (individuals) ή οι γενότυποι (genotypes) που βρίσκονται μέσα σε έναν πληθυσμό. Κάθε άτομο ή γενότυπος αποτελείται από χρωμοσώματα (chromosomes). Τα χρωμοσώματα με τη σειρά τους αποτελούνται από γονίδια (genes) καθένα από τα οποία καθορίζει ένα χαρακτηριστικό του ατόμου και βρίσκονται σε συγκεκριμένες θέσεις του χρωμοσώματος, που καλούνται loci. Οι διαφορετικές καταστάσεις που μπορεί να πάρει κάθε φορά το γονίδιο ονομάζονται alleles.

Ο κάθε γενότυπος αντιστοιχεί σε μια από τις πιθανές λύσεις ενός προβλήματος. Οι Γ.Α., σε αντίθεση με άλλες μεθόδους αναζήτησης, διατηρούν έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων, τον οποίο και επεξεργάζονται. Έτσι, ο πληθυσμός υφίσταται μια προσομοιωμένη γενετική εξέλιξη, η οποία ουσιαστικά αντιστοιχεί σε μια εκτενή αναζήτηση στο χώρο για πιθανές λύσεις. Κατά την αναζήτηση, σε κάθε γενιά, οι ''καλές'' λύσεις αναπαράγονται και μένουν στον αλγόριθμο, ενώ οι ''κακές'' απομακρύνονται. Ο έλεγχος των πιθανών λύσεων γίνεται μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης (objective/fitness function), η οποία παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος στο οποίο αναπτύσσεται ο πληθυσμός. Οι λύσεις που επιλέγονται κάθε φορά να παραμείνουν στον αλγόριθμο αναπαράγονται στην επόμενη γενιά λύσεων και λαμβάνουν μια τυχαία μετάλλαξη. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για αρκετές γενιές, οπότε οι τυχαίες μεταλλάξεις σε συνδυασμό με την επιβίωση και αναπαραγωγή των γονιδίων/λύσεων που πλησιάζουν καλύτερα το επιθυμητό αποτέλεσμα θα παράγουν ένα γονίδιο/λύση που θα περιέχει τις τιμές για τις παραμέτρους που ικανοποιούν όσο καλύτερα γίνεται την συνάρτηση ικανότητας.

Η διαδικασία που ακολουθείται από τους γενετικούς αλγορίθμους για την επίλυση διαφόρων προβλημάτων αποτελείται συνήθως από τα παρακάτω βήματα (Γεωργόπουλος και Λυκοθανάσης, 1999):

- Κωδικοποίηση της λύσης
- Καταρτισμός αρχικού πληθυσμού (Αρχικοποίηση)
- Αποτίμηση πληθυσμού μέσω συνάρτησης ικανότητας
- Επιλογή
- Διασταύρωση
- Μετάλλαξη

3.4.2 Κωδικοποίηση της λύσης

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για την βέλτιστη επίλυση ενός προβλήματος με τη χρήση γενετικού αλγόριθμου είναι ο τρόπος με τον οποίο θα κωδικοποιηθούν- αναπαρασταθούν οι υποψήφιες λύσεις του προβλήματος, η γενετική αναπαράσταση των λύσεων όπως ονομάζεται. Υπάρχουν πολλοί τρόποι αναπαράστασης των υποψήφιων λύσεων, όπως για παράδειγμα η μετατροπή των μεταβλητών σχεδιασμού σε μια σειρά δυαδικών ψηφίων (0,1) (bit string), η χρήση ακέραιων ή πραγματικών αριθμών ή ακόμη και η χρήση χαρακτήρων όπως τα γράμματα της αλφαβήτου. Ακόμη υπάρχουν και πιο πολύπλοκοι τρόποι γενετικής αναπαράστασης όπως για παράδειγμα η δενδροειδής κωδικοποίηση. Όταν πραγματοποιείται κωδικοποίηση συνεχών μεταβλητών με χρήση δυαδικών διανυσμάτων, η ακρίβεια της αναπαράστασης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό των δυαδικών ψηφίων που χρησιμοποιούνται. Συνεπώς με την αύξηση των δυαδικών ψηφίων που χρησιμοποιούνται, η ακρίβεια της αναπαράστασης μεγαλώνει.

3.4.3 Καταρτισμός αρχικού πληθυσμού (Αρχικοποίηση)

Αποτελεί ουσιαστικά το πρώτο στάδιο της επαναληπτικής διαδικασίας, στο οποίο παράγεται τυχαία ένας πληθυσμός από υποψήφιες πιθανές λύσεις. Κάθε μέλος του πληθυσμού αντιστοιχεί σε μια σειρά δυαδικών ψηφίων καθορισμένου μήκους, η οποία αποτελεί την κωδικοποίηση του συνόλου των μεταβλητών σχεδιασμού του προβλήματος. Κάθε μια από αυτές τις σειρές ονομάζεται χρωμόσωμα.

Η επίλυση προβλημάτων με τη χρήση γενετικών αλγόριθμων απαιτεί τον καθορισμό του μεγέθους του πληθυσμού, του αριθμού δηλαδή των χρωμοσωμάτων που αποτελούν τον πληθυσμό κατά το αρχικό στάδιο, αυτό του καταρτισμού του αρχικού πληθυσμού. Αυτό αποτελεί ένα σημαντικό χαρακτηριστικό καθώς ορίζεται από την αρχή του προβλήματος και δε μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια, συνεπώς είναι απαραίτητο το μέγεθος του πληθυσμού να επιλεχθεί σωστά. Πληθυσμοί αποτελούμενοι από μικρό αριθμό χρωμοσωμάτων, παρόλο που ολοκληρώνουν τη διαδικασία του αλγορίθμου αρκετά γρήγορα, η λύση που παράγουν βρίσκεται συχνά σε τοπικά ακρότατα. Ακόμη μικροί πληθυσμοί έχουν μειωμένες πιθανότητες ολοκλήρωσης της διαδικασίας της διασταύρωσης, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα να μην εξετάζεται ολόκληρος ο χώρος αναζήτησης. Αντίθετα πληθυσμοί με μεγάλο αριθμό χρωμοσωμάτων παρότι εξαλείφουν τα παραπάνω προβλήματα, απαιτούν περισσότερο χρόνο για την ολοκλήρωση της αναζήτησης της βέλτιστης λύσης. Θεωρείται ότι σε γενικές περιπτώσεις, ο βέλτιστος αριθμός χρωμοσωμάτων σε έναν πληθυσμό είναι περίπου στα 20-30 ή το πολύ σε 50-100, για πολύπλοκα προβλήματα.

<u>3.4.4 Αποτίμηση πληθυσμού μέσω συνάρτησης ικανότητας</u>

Απαραίτητο και πολύ σημαντικό παράγοντα για την επίλυση του προβλήματος αποτελεί ο καθορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε μέλος του πληθυσμού, δηλαδή της προς βελτιστοποίηση συνάρτησης. Ο υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης κάθε χρωμοσώματος που αντιστοιχεί σε ένα μέρος του συνόλου των παραμέτρων σχεδιασμού είναι ανεξάρτητος από τις τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού άλλων μελών του σχεδιασμού. Αυτό που ορίζεται όμως σε συνάρτηση με τα υπόλοιπα μέλη του πληθυσμού είναι η ποιότητα και η βαθμονόμηση ενός μέλους. Στον απλό γενετικό αλγόριθμο η ποιότητα του μέλους ορίζεται από το πηλίκο :

$$p = \frac{F_i}{F}$$

όπου:

F_i η μέση τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης όλων των μελών του πληθυσμού F

F_i η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που αντιστοιχεί στο χρωμόσωμα i.

3.4.5 Επιλογή

Η εφαρμογή του τελεστή της επιλογής είναι η διαδικασία κατά την οποία επιλέγονται τα χρωμοσώματα από τον πληθυσμό που θα αναπαραχθούν και θα συνεχίσουν στον αλγόριθμο. Τα ικανότερα χρωμοσώματα είναι και εκείνα με τις περισσότερες πιθανότητες να επιλεχθούν για αναπαραγωγή. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι σκοπός της διαδικασίας της επιλογής είναι επιλέγονται τα «ικανότερα» χρωμοσώματα του κάθε πληθυσμού. Θα πρέπει όμως να διατηρείται μια ισορροπία κατά την επιλογή καθώς υπάρχει πιθανότητα ο πληθυσμός να αποτελείται από ιδιαίτερα «ικανά» χρωμοσώματα, αλλά όχι βέλτιστα, μειώνοντας έτσι την ποικιλομορφία του πληθυσμού, η οποία είναι απαραίτητη. Τέλος αποτελεί μια από τις βασικότερες διαδικασίες του αλγορίθμου και εφαρμόζεται σε αυτόν μέσω του ομώνυμου τελεστή.

Έχουν προταθεί πολλές διαδικασίες επιλογής του πληθυσμού, με τις κυριότερες να αναφέρονται παρακάτω (Michalewicz, 1996):

- **Αποδεκατισμός πληθυσμού (Population Decimation):** Αποτελεί την απλούστερη ντετερμινιστική μέθοδο κατά την οποία επιβιώνουν τα χρωμοσώματα με τη βέλτιστη τιμή της συνάρτησης κόστους, ενώ απομακρύνονται αυτά με τη χειρότερη τιμή. Ο πληθυσμός με τη διαδικασία της αναπαραγωγής αποδεκατίζεται και ξαναδημιουργείται. Αρχικά τα άτομα κατατάσσονται σε φθίνουσα σειρά σε σχέση με τη συνάρτηση κόστους. Επιλέγεται μια τιμή σαν τιμή κατωφλίου και όσα χρωμοσώματα με συνάρτηση κόστους μικρότερη της τιμής αυτής, απομακρύνονται από τον πληθυσμό.
- **Αναλογική επιλογή (Proportionate selection):** Η πιο διαδεδομένη διαδικασία αυτής της κατηγορίας είναι η μέθοδος της ρουλέτας με σχισμές (slotted roulette wheel), στην οποία κάθε μέλος του πληθυσμού αντιστοιχίζεται σε ένα κομμάτι της ρουλέτας, με το μέγεθός του να

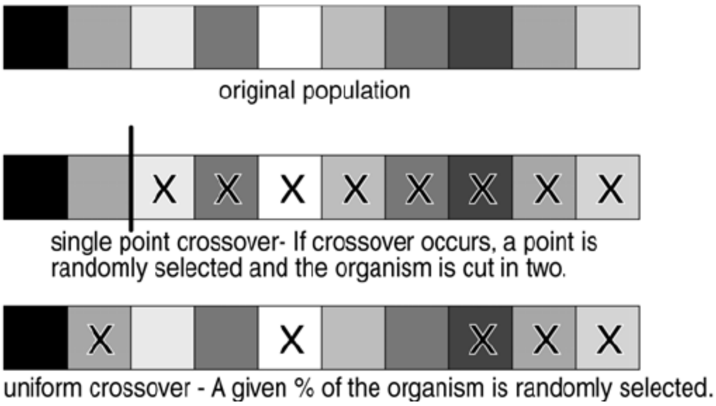
καθορίζεται από το μέγεθος της ικανότητας του. Η ρουλέτα περιστρέφεται τόσες φορές όσος και ο αριθμός των χρωμοσωμάτων του εκάστοτε πληθυσμού, με το χρωμόσωμα που επιλέγεται από κάθε περιστροφή να αποτελεί τον γονέα για τον επόμενο πληθυσμό. Στην περίπτωση αυτή κάθε χρωμόσωμα έχει τη δυνατότητα να επιλεχθεί περισσότερες από μια φορές, έτσι η πιθανότητα επιλογής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα του.

- **Διαβάθμιση Σίγμα (Sigma Scaling):** Η μέθοδος της Διαβάθμισης Σίγμα αποτελεί μια μέθοδο επιλογής η οποία αντιμετωπίζει το φαινόμενο της πρώιμης σύγκλισης. Σε αυτή κρατείται ο βαθμός με τον οποίο τα κατάλληλα άτομα συμμετέχουν στη δημιουργία απογόνων, σε ίδιο επίπεδο καθόλη τη διάρκεια εξέλιξης του αλγόριθμου, χωρίς να μεταβάλλεται από τη διασπορά των τιμών της συνάρτησης κόστους. Η αναμενόμενη τιμή κάθε ατόμου καθορίζεται από την τιμή της συνάρτησης κόστους του f(i), τη μέση τιμή της συνάρτησης κόστους του πληθυσμού f(t) και την τυπική απόκλιση του πληθυσμού s(t) σε χρόνο t.
- **Επιλογή Boltzmann:** Σε αντίθεση με τη Διαβάθμιση Σίγμα στην οποία η πίεση παραμένει επιλογής σταθερή, στην επιλογή Boltzmann υπάρχει διαφοροποίηση στην πίεση επιλογής κατά τη διάρκεια της εξέλιξης. Στη διαδικασία αυτή συνεπώς υπάρχει μια μεταβλητή, της «θερμοκρασίας» που ελέγχει το ρυθμό της επιλογής. Αρχικά η μεταβλητή αυτή έχει υψηλή τιμή ώστε η πίεση της επιλογής να είναι χαμηλή (που σημαίνει ότι κάθε άτομο έχει την πιθανότητα να μετέχει στην αναπαραγωγή). Μετά η μεταβλητή της «θερμοκρασίας» μειώνεται σταδιακά, αυξάνοντας την πίεση της επιλογής, κάτι που δίνει τη δυνατότητα στον γενετικό αλγόριθμο να βρει τη βέλτιστη περιοχή του χώρου αναζήτησης.
- **Επιλογή με βαθμονόμηση (Ranking selection):** Στη μέθοδο αυτή τα χρωμοσώματα ταξινομούνται σε σχέση με το μέτρο της συνάρτησης-ικανότητας κόστους και λαμβάνουν έναν αύξοντα αριθμό. Συνεπώς, η αξία κάθε χρωμοσώματος ρυθμίζεται από το βαθμό του, ενώ το πλήθος των αντιγράφων με τα οποία κάθε μέλος θα αντιπροσωπεύεται στον ενδιάμεσο πληθυσμό εξαρτάται από τον αύξοντα αριθμό κατά την ταξινόμηση.

- **Επιλογή με τουρνουά (Tournament selection):** Στη συγκεκριμένη διαδικασία πραγματοποιείται τυχαία επιλογή ενός αριθμού χρωμοσωμάτων, με το ικανότερο από αυτά να επιλέγεται ως γονέας. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται όσες φορές είναι και το μέγεθος του πληθυσμού, με κάθε επανάληψη να μην εξαρτάται από προηγούμενες.
- **Ελιτισμός (Elitism):** Αποτελεί μια μέθοδο επιλογής που αναγκάζουν τον γενετικό αλγόριθμο να κρατάει έναν αριθμό καλύτερων ατόμων σε κάθε γενιά. Τα άτομα αυτά ή θα χαθούν αν δεν επιλεγούν καθόλου ή θα καταστραφούν με τη μετάλλαξη και τη διασταύρωση, και γι αυτό τον λόγο ο αλγόριθμος τα μεταφέρει αυτούσια στην επόμενη γενιά.
- **Κανονικοποιημένη γεωμετρική βαθμονόμηση (normalized geometric ranking):** Αποτελεί μια ακόμη πιο επιθετική μορφή επιλογής, στην οποία τα άτομα του πληθυσμού βαθμολογούνται από το καλύτερο προς το χειρότερο σε σχέση με την τιμή της συνάρτησης κόστους. Έτσι η κανονικοποιημένη γεωμετρική βαθμονόμηση υπολογίζει την πιθανότητα επιλογής κάθε χρωμοσώματος.
- **Επιλογή σταθερής κατάστασης (Steady-state selection):** Σε αντίθεση με τις περισσότερες μεθόδους επιλογής, σε αυτή τη μέθοδο δεν αντικαθιστούνται όλα τα άτομα σε κάθε γενιά άλλα λίγα από αυτά. Έτσι ένας μικρός αριθμός από τα λιγότερο κατάλληλα άτομα αντικαθιστούνται από απογόνους των πιο ισχυρών χρωμοσωμάτων.

3.4.6 Διασταύρωση

Η διαδικασία της διασταύρωσης εφαρμόζεται με τη χρήση του ομώνυμου τελεστή στον αλγόριθμο και αποτελεί το βασικότερο ίσως χαρακτηριστικό που ξεχωρίζει τους γενετικούς από τους υπόλοιπους εξελικτικούς αλγόριθμους. Στο κομμάτι αυτό επιλέγεται τυχαία μια θέση και ανταλλάσσονται οι αλυσίδες των γονιδίων πριν ή/και ανάμεσα σε δυο χρωμοσώματα στη θέση αυτή, για να παραχθούν δυο απόγονοι. Αρχικά επιλέγονται τα δυο χρωμοσώματα που θα διασταυρωθούν με κάποια πιθανότητα p_c. Στην πιο απλή μορφή της διαδικασίας επιλέγεται τυχαία ένα σημείο-θέση που θα διασταυρωθεί, ώστε να ανταλλάξουν τα αντίστοιχα χρωμοσώματα και να παράξουν απογόνους. Υπάρχει όμως και η δυνατότητα να διασταυρωθούν τυχαία δύο σημεία για να αλλάξουν χρωμοσώματα και να παράξουν απογόνους, κάτι που χρησιμοποιείται ευρέως σε πρακτικές εφαρμογές.



Σχήμα 3.1: Διασταύρωση (Πηγή: Guide to using Evolver, Version 5.7, Palisade Corporation, September 2010)

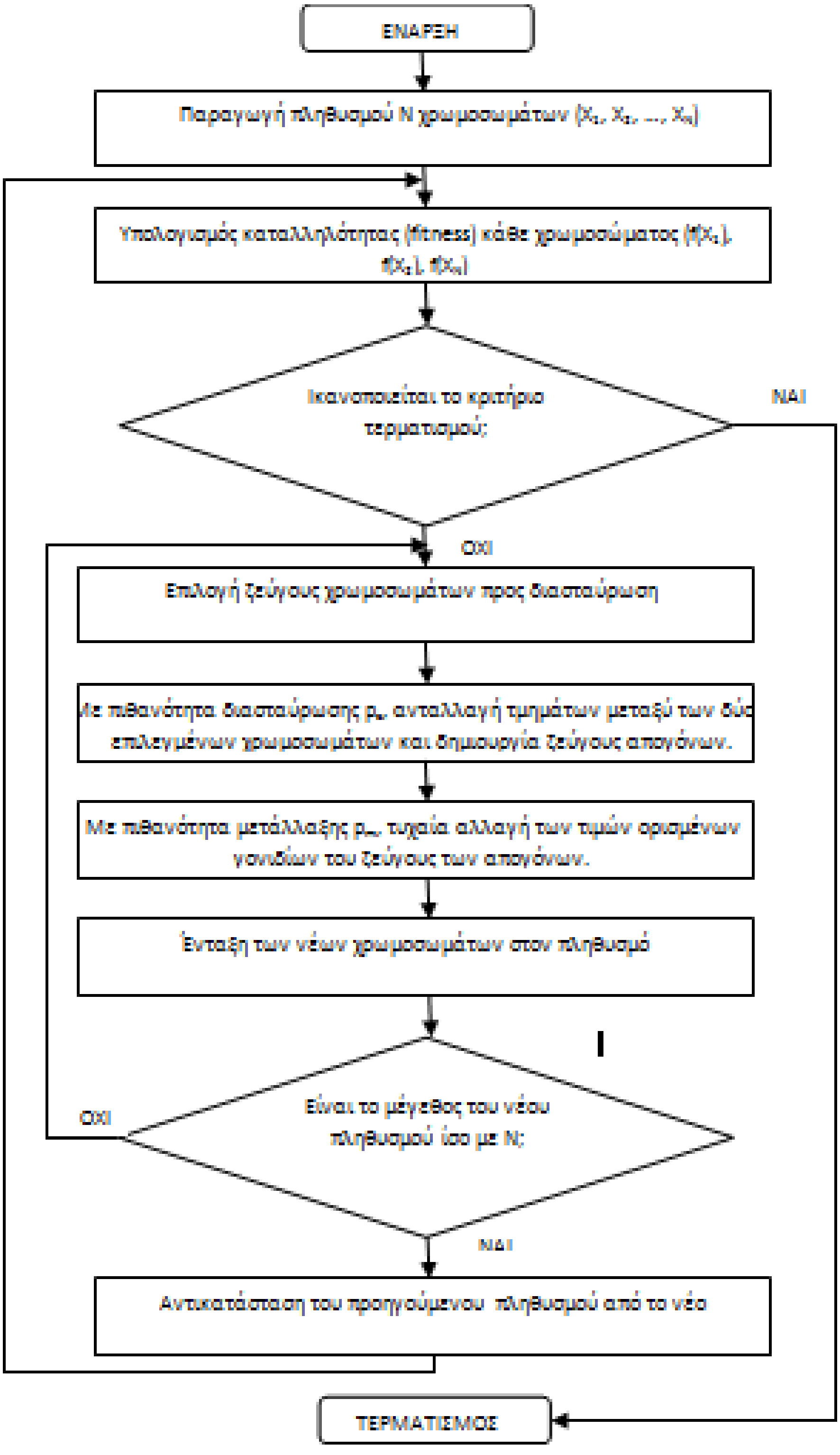
3.4.7 Μετάλλαξη

Ο τελεστής της μετάλλαξης αλλάζει τυχαία την τιμή κάποιων γονιδίων στο χρωμόσωμα. Είναι μια απαραίτητη διαδικασία για τον αλγόριθμο που εξασφαλίζει ουσιαστικά την ύπαρξη μιας μόνιμης κατάστασης σε κάποια θέση και θα μπορούσαμε να πούμε πως λειτουργεί υποστηριχτικά στην διαδικασία της διασταύρωσης. Πιο συγκεκριμένα κατά τη διάρκεια της γενετικής αναπαράστασης με δυαδικό σύστημα, επιλέγονται κάποια δυαδικά ψηφία του πληθυσμού με μικρή πιθανότητα, η οποία δεν ξεπερνά συνήθως το 1%, και αντιστρέφονται, συμβάλλοντας έτσι στην διαφορετικότητα του πληθυσμού.

$$\begin{array}{ll} A''_1 = 0\ 1\ 1\ 0\ 0 & A'''_1 = 0\ 1\ 1\ 0\ 0 \\ A''_2 = 1\ 1\ 0\ 0\ 1 & A'''_2 = 1\ 1\ 0\ 0\ 1 \\ A''_3 = 1\ 1\ 0\ 1\ 1 \quad \Rightarrow & A'''_3 = 1\ 1\ 0\ 1\ 1 \\ A''_4 = 1\ 0\ 0\ 0\ 0 & A'''_4 = 1\ 0\ 0\ 1\ 0 \end{array}$$

Σχήμα 3.2: Τυχαία μετάλλαξη (Πηγή: Βελτιστοποίηση Συστημάτων &

Υδροπληροφορική, Χρήστος Μακρόπουλος & Ανδρέας Ευστρατιάδης 2011)



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα ροής τυπικού Γενετικού Αλγορίθμου. (Πηγή: Μακρόπουλος και Ευστρατιάδης, 2011)

3.4.8 Πλεονεκτήματα γενετικών αλγορίθμων

Η χρήση γενετικών αλγόριθμων για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, με τα σημαντικότερα από τα οποία να είναι τα εξής (Γενετικοί Αλγόριθμοι και Εφαρμογές, Λυκοθανάσης, 2001, σελ:25):

- Μπορούν να επιλύσουν σε σύντομο χρόνο και αξιόπιστα πολύπλοκα προβλήματα. Ένας από τους σημαντικούς λόγους που η χρήση των γενετικών αλγόριθμων είναι ευρεία στις μέρες μας είναι η μεγάλη τους αποδοτικότητα. Έχει αποδειχθεί από πολλές πρακτικές εφαρμογές ότι προβλήματα που έχουν πολλές, δύσκολα προσδιορισμένες, λύσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν καλύτερα από ΓΑ. Ακόμη, είναι άξιο αναφοράς πως συναρτήσεις που παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις και καθιστούν ανεπαρκείς άλλες μεθόδους στην εύρεση των ακρότατων τους, για τους ΓΑ αυτές οι διακυμάνσεις δεν αποτελούν σημεία δυσχέρειας.
- Είναι εύκολα συνεργάσιμοι με τα υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα των ΓΑ είναι πως μπορούν να χρησιμοποιηθούν με προσθετικό τρόπο στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται σήμερα, μη απαιτώντας την επανασχεδίαση τους, απλά με την εγκατάσταση τους σε αυτά. Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τον υπάρχοντα κώδικα. Αυτό συμβαίνει, διότι χρησιμοποιούν μόνο πληροφορίες της διαδικασίας ή συνάρτησης που πρόκειται να βελτιστοποιήσουν, δίχως να ενδιαφέρει άμεσα ο ρόλος της μέσα στο σύστημα ή η όλη δομή του συστήματος.
- Παρέχουν πάρα πολλές δυνατότητες εξέλιξης. Οι ΓΑ είναι ευέλικτοι αλγόριθμοι στους οποίους μπορούν να πραγματοποιηθούν εύκολα αλλαγές, επεκτάσεις και μετεξελίξεις, ανάλογα με την κρίση του σχεδιαστή. Σε πολλές εφαρμογές, έχουν αναφερθεί λειτουργίες των ΓΑ, που δεν είναι αντιγραμμένες από τη φύση ή που έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές, πάντα προς όφελος της απόδοσης. Σε πολλές περιπτώσεις ακόμα, όχι απλά είναι δυνατό αλλά είναι απαραίτητο να

πραγματοποιηθούν αλλαγές στους αλγορίθμους για να επιλυθεί κάποιο πρόβλημα.

- Υπάρχει η δυνατότητα για συμμετοχή σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους. Παρόλο που η ισχύς των ΓΑ είναι μεγάλη, σε μερικές ειδικές περιπτώσεις προβλημάτων, στις οποίες κάποιες άλλες μέθοδοι επίλυσης, λόγω της εξειδίκευσης τους, μπορεί είναι πολύ αποδοτικές υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης ενός υβριδικού σχήματος ΓΑ με άλλη μέθοδο. Αυτό είναι καθίσταται δυνατό λόγω της μεγάλης ευελιξίας των ΓΑ.
- Βρίσκουν εφαρμογή σε πάρα πολλά πεδία, ειδικά σε σχέση με άλλες μεθόδους. Αυτό το πλεονέκτημα έναντι άλλων μεθόδων δίνεται κυρίως λόγω της ελευθερίας επιλογής των κριτηρίων που καθορίζουν την επιλογή μέσα στο τεχνικό περιβάλλον. Έτσι, ΓΑ μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην οικονομία, στο σχεδιασμό μηχανών, στην επίλυση μαθηματικών εξισώσεων, στην εκπαίδευση Νευρωνικών Δικτύων και σε πολλούς άλλους τομείς.
- Δεν απαιτούν περιορισμούς στις συναρτήσεις που επεξεργάζονται. Ο σημαντικότερος λόγος για τον οποίο πολλές άλλες μέθοδοι κρίνονται ακατάλληλες για πολλά προβλήματα είναι η απαίτησή τους για ύπαρξη περιορισμών, όπως ύπαρξη παραγώγων, συνέχεια, όχι «θορυβώδεις» συναρτήσεις κτλ. Τέτοιοι περιορισμοί δεν απαιτούνται για τη χρήση ΓΑ, κάτι που τους κρίνει κατάλληλους για πολλών ειδών προβλήματα.
- Δεν παίζει ρόλο η σημασία της εκάστοτε υπό εξέταση πληροφορίας. Η μόνη «επικοινωνία» που έχει ο ΓΑ με το περιβάλλον του προβλήματος είναι μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτό εγγυάται την επιτυχία του ανεξάρτητα από τη σημασία του προβλήματος. Φυσικά υπάρχουν προβλήματα στα οποία οι ΓΑ αδυνατούν να βρουν λύση, ο λόγος όμως που συμβαίνει δεν είναι το πληροφοριακό περιεχόμενο του προβλήματος αλλά η φύση του χώρου που ερευνούν.
- Έχουν από τη φύση τους το στοιχείο του παραλληλισμού. Σε κάθε στάδιο οι ΓΑ επεξεργάζονται μεγάλες ποσότητες πληροφορίας, αφού κάθε

άτομο θεωρείται αντιπρόσωπος πολλών άλλων. Αυτό τους δίνει τη δυνατότητα να καλύπτουν μεγάλους χώρους με σύντομους χρόνους πολύ αποδοτικά.

- Αποτελούν τη μοναδική μέθοδο που πραγματοποιεί ταυτόχρονα εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και εκμετάλλευση της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας. Αυτά τα δυο χαρακτηριστικά τις περισσότερες φορές είναι ανταγωνιστικά, όμως η επιτυχής συνύπαρξη και αλληλεπίδραση τους ωφελούν σε μεγάλο βαθμό τη διαδικασία. Εκεί έγκειται η μεγάλη αποδοτικότητα και ελκυστικότητα των ΓΑ, στον βέλτιστο συνδυασμό των δυο αυτών χαρακτηριστικών.

3.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

3.5.1 Εισαγωγή

Για την επίλυση του προβλήματος επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το λογισμικό Evolver, το οποίο έχει αναπτυχθεί από την εταιρία Palisade και επιλύει προβλήματα με χρήση γενετικών αλγορίθμων. Το λογισμικό αυτό αποτελεί πρόσθετο πρόγραμμα του υπολογιστικού λογισμικού Microsoft Excel για λύση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Μέσω του Excel εισάγονται τα δεδομένα και οι συναρτήσεις οι οποίες εμφανίζονται στα κελιά του προγράμματος. Οι τιμές των δεδομένων αυτών μεταβάλλονται με τη χρήση του Evolver μέχρι να επιτευχθεί ο στόχος του προβλήματος, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που έχουν τεθεί και τις τιμές των παραμέτρων του γενετικού αλγορίθμου.

Για τη μελέτη θεωρούνται ως οχήματα λεωφορεία, χωρητικότητας 90 επιβατών (Καρλαύτης και Λυμπέρης, 2010)και μέσης ταχύτητας κίνησης 20 km/h. Η ταχύτητα τέθηκε τέτοια ώστε να συνυπολογίζει εκτός από την ταχύτητα που αναπτύσσεται κατά την κίνηση και τις καθυστερήσεις που υπάρχουν κατά την άφιξη και αναχώρηση από τις στάσεις.

3.5.2 Περιγραφή Γενετικού Αλγορίθμου

3.5.2.1 Αναπαράσταση της λύσης

Οι λύσεις του προβλήματος αποτυπώνονται ως χρωμοσώματα που αναπαριστούν μια ακολουθία κόμβων, η οποία ουσιαστικά αποτελεί τη σειρά με την οποία τα λεωφορεία περνούν από κάθε κόμβο-στάση, θεωρώντας πως τα λεωφορεία πρέπει να πραγματοποιήσουν διαδοχικά όλες τις διαδρομές. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα έχουμε ένα σύνολο 15 κόμβων οι οποίοι εξυπηρετούν 3 διαφορετικές διαδρομές, συνεπώς ένα πιθανό γκρουπ χρωμοσωμάτων θα μπορούσε να είναι:

[11 15 7 13 9 2 1 5 12 8 10 14 6 3 4 M.S.1]

[5 10 2 9 8 12 15 1 6 3 11 14 4 7 13 M.S.2]

[1 8 6 12 3 14 10 2 5 9 11 15 4 7 13 M.S.3]

Έτσι, τα λεωφορεία θα ξεκινούν από την πρώτη στάση, θα διασχίζουν όλους τους κόμβους με τη σειρά που φαίνονται παρακάτω και αφού τους έχουν προσπελάσει όλους θα καταλήγουν στον εκάστοτε σταθμό του Μετρό. Κάθε αριθμός αντιπροσωπεύει έναν κόμβο-στάση από αυτούς της μελέτης. Λόγω της ιδιαιτερότητας του προβλήματος μας οι διαδρομές προκύπτουν από μια ευρετική μέθοδο που κατασκευάσαμε και που περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω. Η μέθοδος αυτή δημιουργεί τις διαδρομές με βάση τη ζήτηση που υπάρχει προς τους σταθμούς του Μετρό και εξαντλώντας τη χωρητικότητα των λεωφορείων.

3.5.2.2 Συνάρτηση Ικανότητας

Κάθε γκρουπ χρωμοσωμάτων αξιολογείται σε σχέση με το μέτρο της συνάρτησης ικανότητας που αποδίδει. Η συνάρτηση αυτή αποτελείται από το άθροισμα του συνολικού χρόνου διαδρομής, του αριθμού των διαδρομών που απαιτούνται και του αριθμού των επιβατών που δεν εξυπηρετούνται από το δίκτυο. Συνεπώς το μέτρο της συνάρτησης ικανότητας δίνεται από τη σχέση:

$$C = \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} \sum_{k \in W} C_{ijk} X_{ijk} + \sum_{j \in C} \sum_{k \in W} X_{0jk} + \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} U_{ijk}$$

Όπου:

- C_{ijk} το κόστος που αντιστοιχεί στο τόξο ij για το λεωφορείο k
- $X_{ijk} = 1$ αν ο σύνδεσμος ij βρίσκεται στη διαδρομή του λεωφορείου k, αλλιώς 0
- U_{ijk} ο αριθμός των επιβατών που δεν εξυπηρετούνται από το λεωφορείο k προς τον κόμβο ij
- C το σύνολο των κόμβων
- W το σύνολο των λεωφορείων
- ijp κόμβοι που ανήκουν στο C
- k λεωφορείο που ανήκει στο W

3.5.2.3 Αρχικός Πληθυσμός-Επιλογή

Ο αρχικός πληθυσμός των λύσεων του προβλήματος παράγεται τυχαία. Το μέγεθος του πληθυσμού παίρνει τις τιμές 25, 50 και 75 αντίστοιχα. Για την επιλογή πραγματοποιείται η μέθοδος επιλογής με βαθμονόμηση, στην οποία τα μέλη του πληθυσμού ιεραρχούνται κάθε φορά σε σχέση με το μέτρο της συνάρτησης ικανότητας που αποδίδουν. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει και σε λιγότερο ικανά μέλη του πληθυσμού να συμμετέχουν στην επόμενη γενιά, αποτρέποντας την κυριαρχία των πιο ικανών μελών από τα αρχικά στάδια της διαδικασίας (Blicke and Thiele, 1996), αντίθετα με τη μέθοδο της αναλογικής επιλογής που εφαρμόζεται συχνά και όπου πιθανότητα επιλογής ενός μέλους για αναπαραγωγή είναι ευθέως ανάλογη με το μέτρο της συνάρτησης ικανότητας.

3.5.2.4 Διασταύρωση

Στο κομμάτι αυτό του γενετικού αλγορίθμου επιλέγονται τυχαία δυο σημεία του χρωμοσώματος γονέα και τα γονίδια που περιέχονται στο τμήμα που ορίζουν αντιγράφονται στον πρώτο απόγονο (Toth and Vigo, 2002). Τα υπόλοιπα γονίδια, τα οποία δεν περιέχονται στο τμήμα αντιγράφονται με τη σειρά που εμφανίζονται στο δεύτερο γονέα. Ύστερα ακολουθείται η ίδια διαδικασία για τον δεύτερο απόγονο, κατά την οποία αντιστρέφονται οι ρόλοι των γονέων. Έτσι διατηρούνται ορισμένες από τις διατάξεις μέσα στο χρωμόσωμα, ενώ δημιουργούνται και κάποιες νέες. Ένα παράδειγμα είναι: [1 2 3 **4 5 6 7** 8 9 10] → [2 8 10 **4 5 6 7** 9 3 1]

[2 5 8 **4 10 9 7** 3 1 6] → [1 2 3 **4 10 9 7** 5 6 8]

3.5.2.5 Μετάλλαξη

Η λειτουργία της μετάλλαξης πραγματοποιείται για τη διατήρηση των τιμών των γονιδίων, ανταλλάσοντας τις θέσεις κάποιων τιμών στον οργανισμό. Ο αριθμός των ανταλλαγών αυτών αυξάνεται ή μειώνεται αντίστοιχα με την αύξηση ή μείωση της παραμέτρου της μετάλλαξης (από 0 ως 1). Ένα παράδειγμα είναι:

[1 2 3 **4** 5 6 7 **8** 9 10] → [1 2 3 **8** 5 6 7 **4** 9 10]

3.5.2.6 Αντικατάσταση

Για το κομμάτι αυτό χρησιμοποιείται μια μέθοδος αντικατάστασης η οποία έχει σαν βάση την κατάταξη των μελών του πληθυσμού, όπου τα λιγότερο ‘ικανά’ μέλη αντικαθιστώνται από νέα τα οποία δημιουργούνται από τις διαδικασίες της επιλογής, της διασταύρωσης και της μετάλλαξης και που είναι ανεξάρτητα από την τιμή της συνάρτησης ικανότητας (Holland, 1975).

3.5.2.7 Αλγόριθμος διαχωρισμού διαδρομών

Η πολυπλοκότητα του προβλήματος που καλούμαστε να επιλύσουμε καθιστά αναγκαία την κατασκευή αλγορίθμου ο οποίος θα διαχωρίζει και θα βρίσκει τις εφικτές διαδρομές μέσα στο χρωμόσωμα. Ο αλγόριθμος ορίζει τις απαιτούμενες διαδρομές με βάση τη ζήτηση που υπάρχει προς τους σταθμούς του Μετρό και υπολογίζει ταυτόχρονα το κόστος κάθε διαδρομής, που ισούται με το μέτρο της συνάρτησης ικανότητας.

Βήμα 1: Εκκίνηση

Ο αλγόριθμος ξεκινά με το πρώτο γονίδιο του χρωμοσώματος, που αντιπροσωπεύει τον πρώτο κόμβο-στάση λεωφορείου της διαδρομής.

Βήμα 2: Κατασκευή βασικών διαδρομών

Ο αλγόριθμος υπολογίζει για κάθε κόμβο του αποτελεί την ακολουθία του χρωμοσώματος, το άθροισμα των επιβατών με αφετηρία τον εκάστοτε κόμβο και προορισμό τον σταθμό του μετρό.

Βήμα 3: Ολοκλήρωση βασικών διαδρομών

Περίπτωση 1: Αν οι περιορισμοί χωρητικότητας του λεωφορείου παραβιάζονται από την αρχή, ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα 1 και θέτει τον κόμβο που παραβιάστηκε ο περιορισμός ως τον πρώτο στην επόμενη διαδρομή.

Περίπτωση 2: Αν οι περιορισμοί χωρητικότητας του λεωφορείου δεν παραβιάζονται, προστίθεται ο επόμενος κατά σειρά κόμβος στη διαδρομή. Ακόμη, αφαιρείται από τη μέγιστη χωρητικότητα του λεωφορείου ο αριθμός των επιβατών που επιβιβάζονται ώστε να υπολογιστεί τυχόν περιθώριο χωρητικότητας. Εάν οι επιβάτες που επιθυμούν να επιβιβαστούν είναι περισσότεροι από τη διαθέσιμη χωρητικότητα, επιβιβάζονται όσοι χωρούν και ο αριθμός και ο κόμβος των υπολοίπων αποθηκεύεται στη μνήμη. Ύστερα ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα 1, περνώντας στον επόμενο κόμβο. Αν δεν είναι δυνατό να προστεθεί άλλος κόμβος στη διαδρομή, ο αλγόριθμος θέτει την επόμενη στάση ως πρώτη για την επόμενη διαδρομή.

Βήμα 4: Κατασκευή πρόσθετων διαδρομών

Ο αλγόριθμος εντοπίζει τους κόμβους όπου υπάρχουν επιβάτες που δεν έχουν επιβιβαστεί στις διαδρομές λόγω έλλειψης χωρητικότητας από την περίπτωση 2 και κατασκευάζει επιπρόσθετες διαδρομές που θα κινηθούν μόνο στους κόμβους που υπάρχουν ανικανοποίητοι επιβάτες. Έτσι με τους ίδιους περιορισμούς χωρητικότητας με τις αρχικές διαδρομές δημιουργούνται οι πρόσθετες που στόχο έχουν να καλύψουν τους επιβάτες που δεν εξυπηρετήθηκαν από τις αρχικές. Οι διαδρομές αυτές είναι κυκλικές, θεωρείται δηλαδή ότι έχουν ως αφετηρία το σταθμό του μετρό (όπου το λεωφορείο έχει καταλήξει από την προηγούμενη διαδρομή) και επιστρέφουν αφού συλλέξουν τους επιβάτες.

Βήμα 5: Τερματισμός διαδικασίας

Η διαδικασία τερματίζει όταν όλοι οι κόμβοι συμπεριληφθούν σε κάποια διαδρομή τόσο στις αρχικές όσο και στις πρόσθετες διαδρομές.

3.5.2.8 Τερματισμός γενετικού αλγορίθμου

Μετά από πολλές δοκιμές διαπιστώθηκε πως τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου σταθεροποιούνται και δεν παρουσιάζουν κάποια σημαντική μεταβολή μετά το πέρας 10-15 λεπτών. Έτσι επιλέχθηκε ο αλγόριθμος να τερματίζει μετά από χρόνο τρεξίματος ίσο με 20 λεπτά.

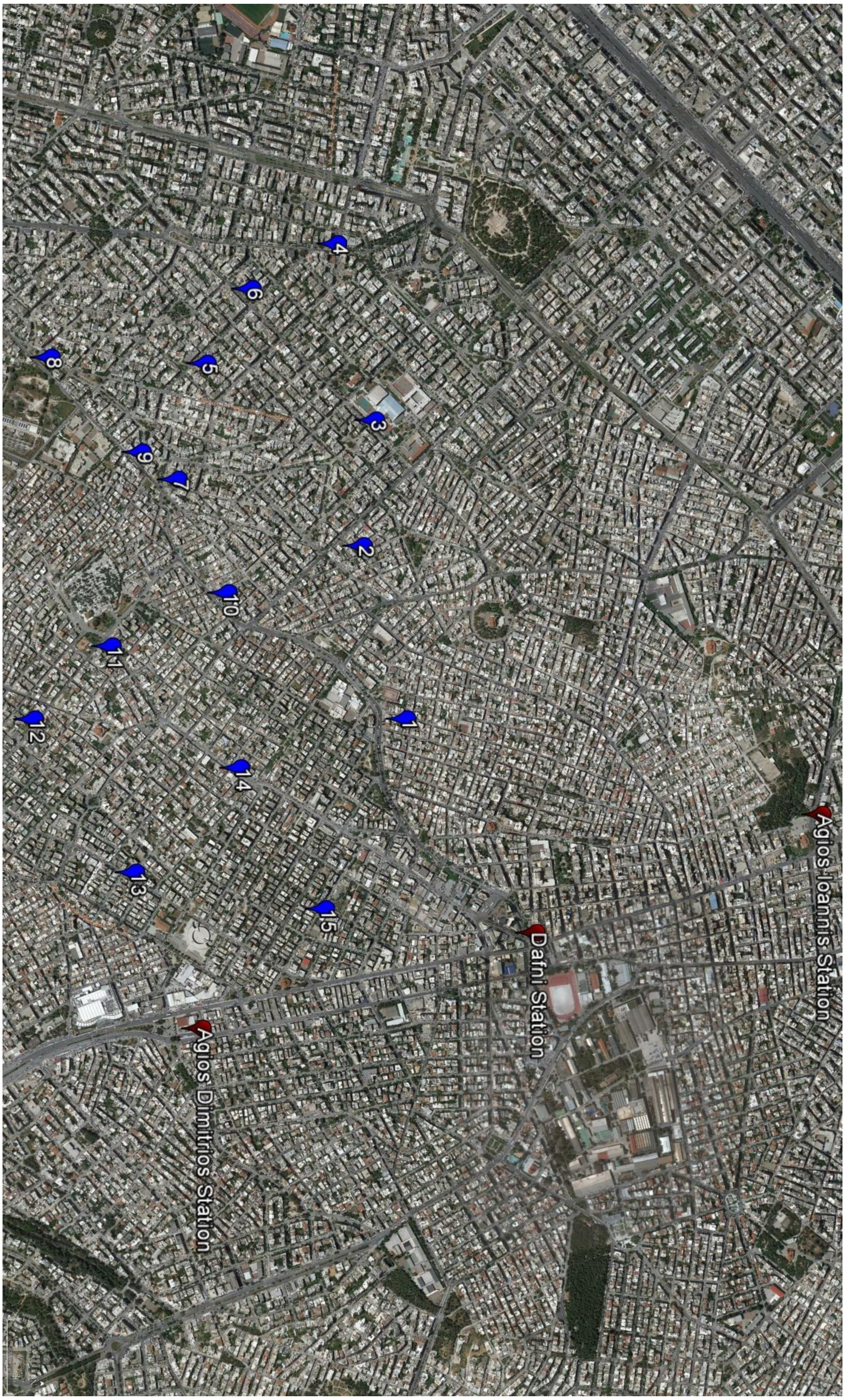
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου για την επίλυση του προβλήματος και παρουσιάζεται αναλυτικά και σχηματικά η βέλτιστη διαδρομή που προέκυψε από αυτή. Ακόμα πραγματοποιείται μια ανάλυση ευαισθησίας για τις παραμέτρους του γενετικού που δίνουν τη βέλτιστη διαδρομή, με διάφορες μεταβλητές του προβλήματος.

4.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Ο αλγόριθμος επιλέχθηκε να εφαρμοστεί σε μια περιοχή μεταξύ των Δήμων Δάφνης, Νέας Σμύρνης και Αγίου Δημητρίου, με τη δημιουργία του δικτύου των διαδρομών να την συνδέει με τους σταθμούς μετρό Άγιος Ιωάννης, Δάφνη και Άγιος Δημήτριος. Στο σχήμα 4.1 φαίνεται η περιοχή μελέτης και στους πίνακες 4.1, 4.2, 4.3 και 4.4 παρουσιάζονται αρχικά οι αποστάσεις μεταξύ των στάσεων που επιλέχθηκαν και των σταθμών μετρό σε χιλιόμετρα αλλά και η ζήτηση από αυτές τις στάσεις προς τους σταθμούς του μετρό (το μητρώο ζήτησης έχει παραχθεί με τυχαίο τρόπο). Η χωρητικότητα του λεωφορείου λαμβάνεται ίση με 90 θέσεις και η ταχύτητα κίνησης των λεωφορείων ίση με 20 χιλιόμετρα την ώρα.



Σχήμα 4.1: Περιοχή Εφαρμογής Γενετικού Αλγορίθμου

Πίνακας 4.1: Αποστάσεις μεταξύ στάσεων και σταθμού μετρό Δάφνη

	Distances(km)	ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ	6Η ΑΙΓΑΙΟΥ	8Η ΑΡΤΑΚΗΣ	ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ	ΛΟΥΤΡΑ	10Η ΑΡΤΑΚΗΣ	ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ	ΙΑΣΩΝΟΣ	ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ	ΑΙΝΟΥ	ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ	ΜΟΥΡΙΚΗ	3Η ΠΑΠΑΓΟΥ	ΣΧΟΛΕΙΟ	ΠΑΝΑΓΙΣΤΑ	ΜΕΤΡΟ ΔΑΦΝΗ
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	R.S.
ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ	1	0	0,8	1,7	2,6	1,7	2	1	1,4	1,1	0,6	1,1	1,6	1,8	1	1,8	2,2
6Η ΑΙΓΑΙΟΥ	2	1,5	0	0,9	1,8	0,9	1,3	0,8	1,3	1	0,5	1	1,4	1,9	1	1,8	2
8Η ΑΡΤΑΚΗΣ	3	1,8	0,5	0	1,7	0,7	1	1,3	1,2	1,4	1	1,4	1,9	2,4	1,4	2,3	2,3
ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ	4	2,6	1,1	0,7	0	0,5	0,7	1,5	1	1,4	1,6	2	2,5	2,8	2,1	3	3
ΛΟΥΤΡΑ	5	2,5	1,5	0,8	1,5	0	0,8	0,4	0,6	0,7	1,2	1,5	1,8	2,3	2	2,9	2,9
10Η ΑΡΤΑΚΗΣ	6	2,5	1	0,5	1,8	0,3	0	1,1	0,9	1	1,4	1,5	2,1	2,6	1,9	2,8	2,8
ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ	7	1,7	0,7	1,1	1,8	0,9	1,1	0	0,5	0,1	0,4	0,7	1,2	1,7	1,1	2	2,1
ΙΑΣΩΝΟΣ	8	2,2	1,2	1,3	1,6	0,7	0,8	0,45	0	0,4	0,9	1,1	1,5	2	1,6	2,6	2,6
ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ	9	1,9	0,8	1,2	1,7	0,9	1	0,12	0,4	0	0,5	0,8	1,3	1,8	1,3	2,2	2,3
ΑΙΝΟΥ	10	1,3	0,45	1,3	2,2	1,2	1,4	0,35	0,8	0,5	0	0,5	1	1,4	0,8	1,7	1,7
ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ	11	1,5	1	1,8	2,7	1,7	1,9	0,75	1,3	0,9	0,7	0	0,5	1	0,8	1,6	2
ΜΟΥΡΙΚΗ	12	1,4	1,2	2,1	2,8	2	2	1,2	1,4	1,1	0,9	0,6	0	1	0,7	1,7	1,9
3Η ΠΑΠΑΓΟΥ	13	1,2	2	2,9	3,8	2,8	3,3	2,2	2,7	2,3	1,8	1,8	1,6	0	1,3	0,7	1,8
ΣΧΟΛΕΙΟ	14	0,7	0,9	1,8	2,7	1,7	2,1	1,1	1,5	1,2	0,8	0,6	1,1	1,2	0	0,9	1,2
ΠΑΝΑΓΙΣΤΑ	15	0,6	1,4	2,3	3,1	2,3	2,6	1,6	2	1,7	1,2	1,1	1,6	1,4	0,6	0	1,1
ΜΕΤΡΟ ΔΑΦΝΗ	R.S.	0,7	1,5	2,3	2,8	2,4	2,7	1,6	2,1	1,8	1,3	1,4	1,9	1,7	0,9	1,4	0

Πίνακας 4.2: Αποστάσεις μεταξύ στάσεων και σταθμού μετρό Άγιου Ιωάννη

	Distances(km)	ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ	6Η ΑΙΓΑΙΟΥ	8Η ΑΡΤΑΚΗΣ	ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ	ΛΟΥΤΡΑ	10Η ΑΡΤΑΚΗΣ	ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ	ΙΑΣΩΝΟΣ	ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ	ΑΙΝΟΥ	ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ	ΜΟΥΡΙΚΗ	3Η ΠΑΠΑΓΟΥ	ΣΧΟΛΕΙΟ	ΠΑΝΑΓΙΣΤΑ	ΜΕΤΡΟ ΑΓ.ΙΩΑΝΝΗΣ
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	R.S.
ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ	1	0	0,8	1,7	2,6	1,7	2	1	1,4	1,1	0,6	1,1	1,6	1,8	1	1,8	3,1
6Η ΑΙΓΑΙΟΥ	2	1,5	0	0,85	1,8	0,9	1,3	0,8	1,3	1	0,5	1	1,4	1,9	1	1,8	2,3
8Η ΑΡΤΑΚΗΣ	3	1,8	0,5	0	1,7	0,7	1	1,3	1,2	1,4	1	1,4	1,9	2,4	1,4	2,3	2,2
ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ	4	2,6	1,1	0,65	0	0,5	0,7	1,5	1	1,4	1,6	2	2,5	2,8	2,1	3	2,8
ΛΟΥΤΡΑ	5	2,5	1,5	0,75	1,5	0	0,8	0,4	0,6	0,7	1,2	1,5	1,8	2,3	2	2,9	3
10Η ΑΡΤΑΚΗΣ	6	2,5	1	0,5	1,8	0,3	0	1,1	0,9	1	1,4	1,5	2,1	2,6	1,9	2,8	2,7
ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ	7	1,7	0,7	1,1	1,8	0,9	1,1	0	0,5	0,1	0,4	0,7	1,2	1,7	1,1	2	3
ΙΑΣΩΝΟΣ	8	2,2	1,2	1,3	1,6	0,7	0,8	0,5	0	0,4	0,9	1,1	1,5	2	1,6	2,6	3,4
ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ	9	1,9	0,8	1,2	1,7	0,9	1	0,1	0,4	0	0,5	0,8	1,3	1,8	1,3	2,2	3,1
ΑΙΝΟΥ	10	1,3	0,5	1,3	2,2	1,2	1,4	0,4	0,8	0,5	0	0,5	1	1,4	0,8	1,7	2,7
ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ	11	1,5	1	1,8	2,7	1,7	1,9	0,8	1,3	0,9	0,7	0	0,5	1	0,8	1,6	3
ΜΟΥΡΙΚΗ	12	1,4	1,2	2,1	2,8	2	2	1,2	1,4	1,1	0,9	0,6	0	1	0,7	1,7	2,9
3Η ΠΑΠΑΓΟΥ	13	1,2	2	2,9	3,8	2,8	3,3	2,2	2,7	2,3	1,8	1,8	1,6	0	1,3	0,7	2,8
ΣΧΟΛΕΙΟ	14	0,7	0,9	1,8	2,7	1,7	2,1	1,1	1,5	1,2	0,8	0,6	1,1	1,2	0	0,9	2,2
ΠΑΝΑΓΙΣΤΑ	15	0,6	1,4	2,3	3,1	2,3	2,6	1,6	2	1,7	1,2	1,1	1,6	1,4	0,6	0	2,1
ΜΕΤΡΟ ΑΓ.ΙΩΑΝΝΗΣ	R.S.	1,7	2	2,8	2,5	2,8	3,3	2,6	3,1	2,8	2,3	2,4	2,9	2,4	1,9	2	0

Πίνακας 4.3: Αποστάσεις μεταξύ στάσεων και σταθμού μετρό Άγιου Δημήτριου

	Distances(km)	ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ	6Η ΑΙΓΑΙΟΥ	8Η ΑΡΤΑΚΗΣ	ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ	ΛΟΥΤΡΑ	10Η ΑΡΤΑΚΗΣ	ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ	ΙΑΣΩΝΟΣ	ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ	ΑΙΝΟΥ	ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ	ΜΟΥΡΙΚΗ	3Η ΠΑΠΑΓΟΥ	ΣΧΟΛΕΙΟ	ΠΑΝΑΓΙΣΤΑ	ΜΕΤΡΟ ΑΓ.ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	R.S.
ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ	1	0	0,8	1,7	2,6	1,7	2	1	1	1,1	1	1,1	1,6	1,8	1	1,8	2,4
6Η ΑΙΓΑΙΟΥ	2	1,5	0	0,9	1,8	0,9	1,3	0,8	1	1	0	1	1,4	1,9	1	1,8	2,1
8Η ΑΡΤΑΚΗΣ	3	1,8	0,5	0	1,7	0,7	1	1,3	1	1,4	1	1,4	1,9	2,4	1,4	2,3	2,6
ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ	4	2,6	1,1	0,7	0	0,5	0,7	1,5	1	1,4	2	2	2,5	2,8	2,1	3	3,2
ΛΟΥΤΡΑ	5	2,5	1,5	0,8	1,5	0	0,8	0,4	1	0,7	1	1,5	1,8	2,3	2	2,9	3,1
10Η ΑΡΤΑΚΗΣ	6	2,5	1	0,5	1,8	0,3	0	1,1	1	1	1	1,5	2,1	2,6	1,9	2,8	3,1
ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ	7	1,7	0,7	1,1	1,8	0,9	1,1	0	0	0,1	0	0,7	1,2	1,7	1,1	2	2,3
ΙΑΣΩΝΟΣ	8	2,2	1,2	1,3	1,6	0,7	0,8	0,5	0	0,4	1	1,1	1,5	2	1,6	2,6	2,8
ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ	9	1,9	0,8	1,2	1,7	0,9	1	0,1	0	0	1	0,8	1,3	1,8	1,3	2,2	2,4
ΑΙΝΟΥ	10	1,3	0,5	1,3	2,2	1,2	1,4	0,4	1	0,5	0	0,5	1	1,4	0,8	1,7	1,9
ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ	11	1,5	1	1,8	2,7	1,7	1,9	0,8	1	0,9	1	0	0,5	1	0,8	1,6	2,2
ΜΟΥΡΙΚΗ	12	1,4	1,2	2,1	2,8	2	2	1,2	1	1,1	1	0,6	0	1	0,7	1,7	2,1
3Η ΠΑΠΑΓΟΥ	13	1,2	2	2,9	3,8	2,8	3,3	2,2	3	2,3	2	1,8	1,6	0	1,3	0,7	1,1
ΣΧΟΛΕΙΟ	14	0,7	0,9	1,8	2,7	1,7	2,1	1,1	2	1,2	1	0,6	1,1	1,2	0	0,9	1,3
ΠΑΝΑΓΙΣΤΑ	15	0,6	1,4	2,3	3,1	2,3	2,6	1,6	2	1,7	1	1,1	1,6	1,4	0,6	0	1,1
ΜΕΤΡΟ ΑΓ.ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ	R.S.	1,2	1,8	2,7	3,6	2,7	3	2	2	2,1	2	1,5	1,2	0,7	1,2	0,7	0

Πίνακας 4.4: Ζήτηση από κάθε στάση προς κάθε σταθμό μετρό

Demand(pass)	ΜΕΤΡΟ ΔΑΦΝΗ	ΜΕΤΡΟ ΑΓ.ΙΩΑΝΝΗΣ	ΜΕΤΡΟ ΑΓ.ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ	23	26	35
6Η ΑΙΓΑΙΟΥ	40	53	45
8Η ΑΡΤΑΚΗΣ	51	75	63
ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ	34	25	43
ΛΟΥΤΡΑ	95	64	72
10Η ΑΡΤΑΚΗΣ	64	38	85
ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ	72	76	63
ΙΑΣΩΝΟΣ	60	64	50
ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ	12	52	42
ΑΙΝΟΥ	21	12	26
ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ	16	42	21
ΜΟΥΡΙΚΗ	30	36	35
3Η ΠΑΠΑΓΟΥ	15	48	18
ΣΧΟΛΕΙΟ	7	9	12
ΠΑΝΑΓΙΣΤΑ	2	11	8

4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

Για την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με μέγεθος πληθυσμού 25, 50, 75, συντελεστή διασταύρωσης 0.2, 0.4, 0.6 και συντελεστή μετάλλαξης 0.05, 0.1 και 0.15. Ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 5 φορές για κάθε συνδυασμό αυτών των τριών μεταβλητών, δηλαδή συνολικά 135 φορές.

Ο πίνακας 4.5 παρουσιάζει τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών του αλγορίθμου, τον αριθμό των διαδρομών που απαιτούνται, το πλήθος των ανικανοποίητων επιβατών μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου καθώς και τη μέση τιμή των αποτελεσμάτων κάθε συνδυασμού μεταβλητών και την τυπική απόκλιση.

Ο συνδυασμός που δίνει τα καλύτερα, κατά μέσο όρο, αποτελέσματα είναι αυτός με πληθυσμό 25, συντελεστή διασταύρωσης 0.2 και συντελεστή μετάλλαξης 0.05. Τα δίκτυα που προκύπτουν από την καλύτερη λύση και επιλύουν με τον βέλτιστο τρόπο το πρόβλημα παρουσιάζεται στα σχήματα 4.2, 4.3 και 4.4. Όπως γίνεται φανερό από τα αποτελέσματα, οι διαφορετικοί συνδυασμοί παραμέτρων αποδίδουν και διαφορετικά αποτελέσματα, με τις συναρτήσεις ικανότητας να παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές, σε αντίθεση με τον αριθμό των διαδρομών ο οποίος παραμένει ο ίδιος με κάθε συνδυασμό.

Ο αλγόριθμος εκτελέστηκε σε υπολογιστή με επεξεργαστή 2,6 GHz και μνήμη RAM 4 GB.

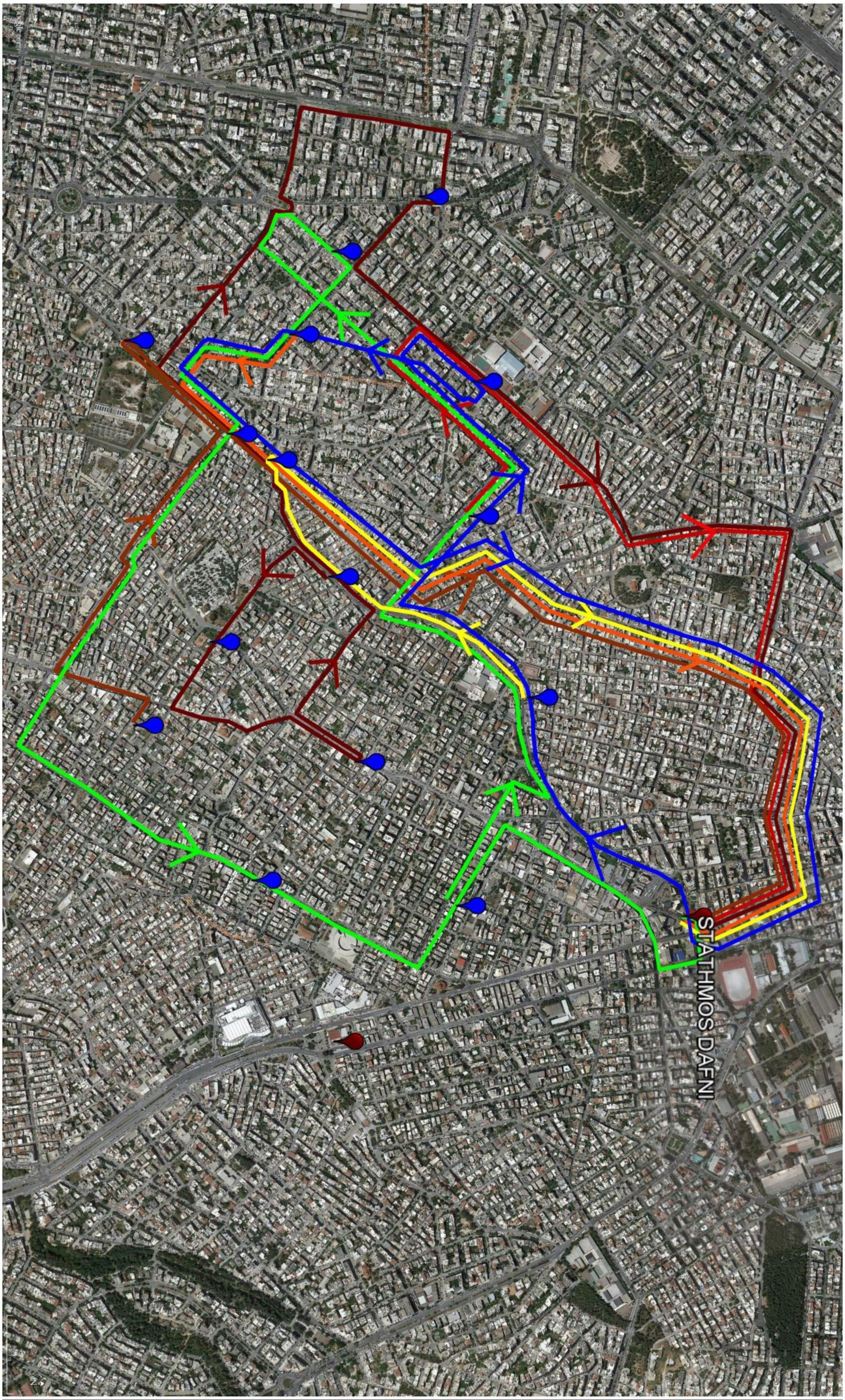
Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου για κάθε δυνατό συνδυασμό παραμέτρων

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Unserved	Routes	Running Time	Average Fitness	Standard Deviation
50	0,2	0,05	105,87	0	7,8,8	0:20:00	115,74	7,60
			126,53	0	7,8,8	0:20:00		
			122,48	0	7,8,8	0:20:00		
			112,32	0	7,8,8	0:20:00		
			111,48	0	7,8,8	0:20:00		
50	0,2	0,1	111,03	0	7,8,8	0:20:00	116,47	4,20
			122,36	0	7,8,8	0:20:00		
			120,02	0	7,8,8	0:20:00		
			113,19	0	7,8,8	0:20:00		

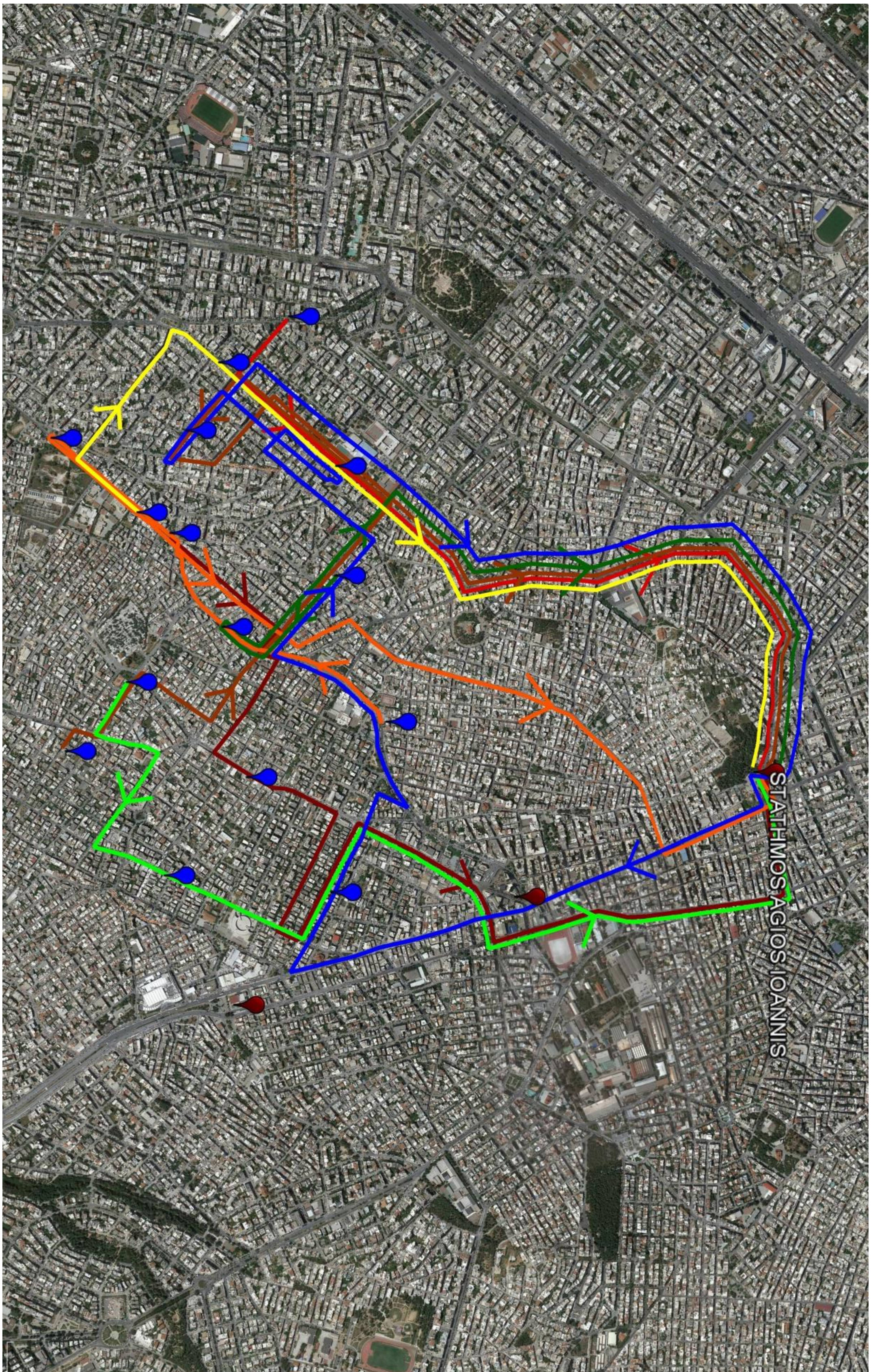
Population	Crossover	Mutation	Fitness	Unserved	Routes	Running Time	Average Fitness	Standard Deviation
			115,73	21	7,8,8	0:20:00		
50	0,2	0,15	119,56	23	7,8,8	0:20:00	120,27	8,62
			106,76	0	7,8,8	0:20:00		
			133,98	0	7,8,8	0:20:00		
			120,84	0	7,8,8	0:20:00		
			120,20	0	7,8,8	0:20:00		
50	0,4	0,05	128,80	55	7,8,8	0:20:00	125,46	4,91
			132,61	45	7,8,8	0:20:00		
			124,92	0	7,8,8	0:20:00		
			118,44	0	7,8,8	0:20:00		
			122,55	12	7,8,8	0:20:00		
50	0,4	0,1	119,14	0	7,8,8	0:20:00	119,35	9,41
			119,27	0	7,8,8	0:20:00		
			111,10	0	7,8,8	0:20:00		
			110,62	0	7,8,8	0:20:00		
			136,61	0	7,8,8	0:20:00		
50	0,4	0,15	119,46	21	7,8,8	0:20:00	123,66	6,62
			131,40	6	7,8,8	0:20:00		
			116,13	0	7,8,8	0:20:00		
			119,47	0	7,8,8	0:20:00		
			131,86	0	7,8,8	0:20:00		
50	0,6	0,05	136,19	0	7,8,8	0:20:00	131,97	3,25
			135,19	0	7,8,8	0:20:00		
			129,68	0	7,8,8	0:20:00		
			127,65	0	7,8,8	0:20:00		
			131,14	73	7,8,8	0:20:00		
50	0,6	0,1	124,71	0	7,8,8	0:20:00	118,12	7,95
			103,47	0	7,8,8	0:20:00		
			123,38	0	7,8,8	0:20:00		
			115,91	0	7,8,8	0:20:00		
			123,13	0	7,8,8	0:20:00		
50	0,6	0,15	132,97	0	7,8,8	0:20:00	122,31	12,59
			139,92	0	7,8,8	0:20:00		
			120,96	0	7,8,8	0:20:00		
			107,33	0	7,8,8	0:20:00		
			110,38	20	7,8,8	0:20:00		
25	0,2	0,05	111,46	0	7,8,8	0:20:00	112,24	6,03
			108,50	0	7,8,8	0:20:00		
			116,95	0	7,8,8	0:20:00		
			103,64	21	7,8,8	0:20:00		
			120,66	0	7,8,8	0:20:00		
25	0,2	0,1	119,61	0	7,8,8	0:20:00	121,18	3,02

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Unserved	Routes	Running Time	Average Fitness	Standard Deviation
			119,47	0	7,8,8	0:20:00		
			125,49	0	7,8,8	0:20:00		
			117,41	0	7,8,8	0:20:00		
			123,91	0	7,8,8	0:20:00		
25	0,2	0,15	118,46	0	7,8,8	0:20:00	116,36	8,27
			119,27	21	7,8,8	0:20:00		
			100,29	20	7,8,8	0:20:00		
			124,11	0	7,8,8	0:20:00		
			119,69	0	7,8,8	0:20:00		
25	0,4	0,05	122,24	0	7,8,8	0:20:00	120,72	5,32
			124,78	0	7,8,8	0:20:00		
			126,26	21	7,8,8	0:20:00		
			111,29	4	7,8,8	0:20:00		
			119,00	0	7,8,8	0:20:00		
25	0,4	0,1	99,35	0	7,8,8	0:20:00	116,15	11,35
			106,54	0	7,8,8	0:20:00		
			125,68	0	7,8,8	0:20:00		
			128,85	0	7,8,8	0:20:00		
			120,31	34	7,8,8	0:20:00		
25	0,4	0,15	124,03	0	7,8,8	0:20:00	121,64	4,29
			115,83	0	7,8,8	0:20:00		
			117,10	0	7,8,8	0:20:00		
			125,90	21	7,8,8	0:20:00		
			125,32	0	7,8,8	0:20:00		
25	0,6	0,05	135,87	4	7,8,8	0:20:00	125,45	7,99
			130,14	0	7,8,8	0:20:00		
			114,86	0	7,8,8	0:20:00		
			117,43	0	7,8,8	0:20:00		
			128,97	43	7,8,8	0:20:00		
25	0,6	0,1	108,00	0	7,8,8	0:20:00	118,71	10,01
			115,43	0	7,8,8	0:20:00		
			112,20	0	7,8,8	0:20:00		
			121,10	0	7,8,8	0:20:00		
			136,82	0	7,8,8	0:20:00		
25	0,6	0,15	122,90	0	7,8,8	0:20:00	116,84	5,76
			122,27	0	7,8,8	0:20:00		
			108,76	0	7,8,8	0:20:00		
			118,92	0	7,8,8	0:20:00		
			111,37	0	7,8,8	0:20:00		
75	0,2	0,05	108,50	0	7,8,8	0:20:00	118,46	5,66
			123,39	28	7,8,8	0:20:00		
			124,48	0	7,8,8	0:20:00		

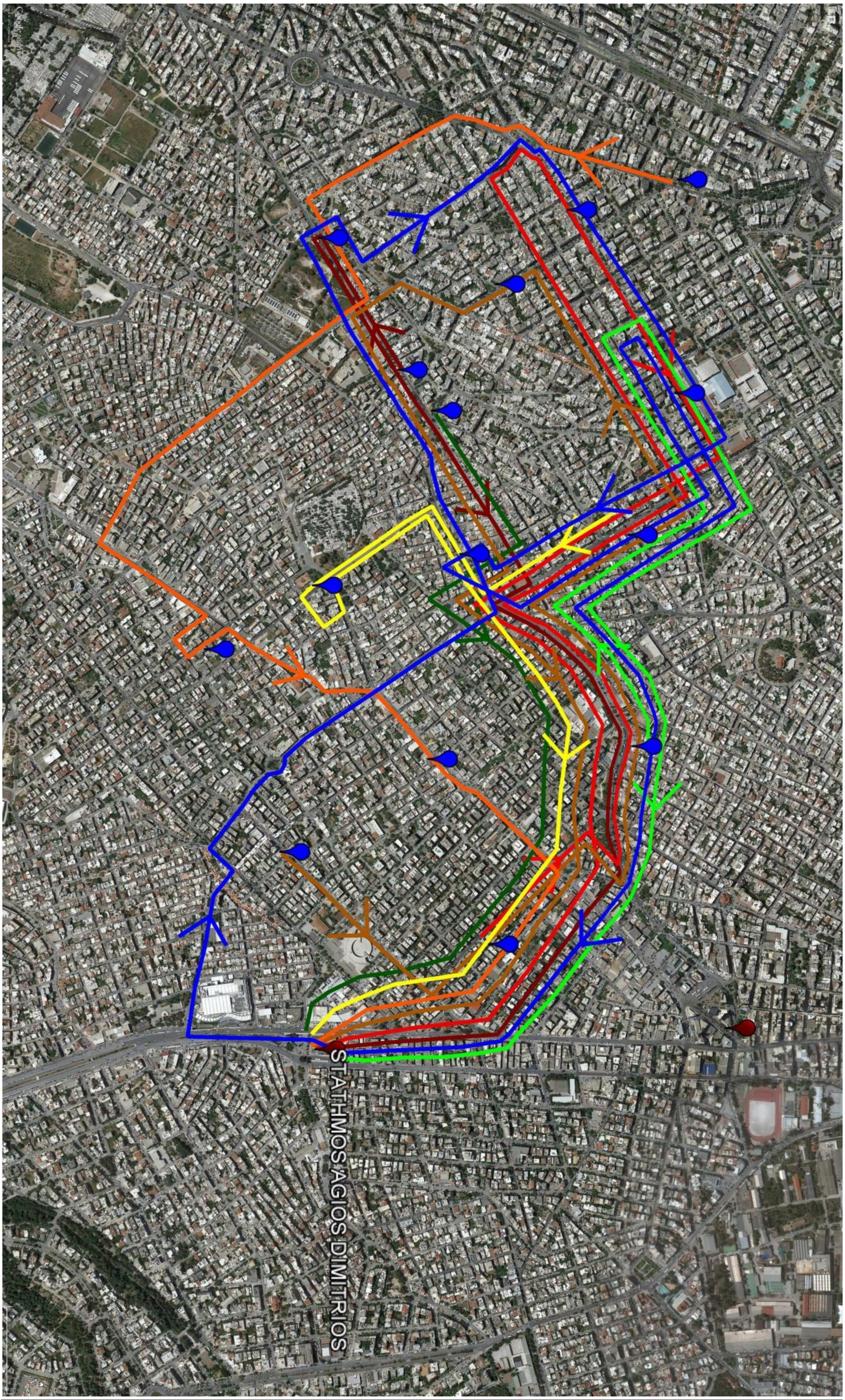
Population	Crossover	Mutation	Fitness	Unserved	Routes	Running Time	Average Fitness	Standard Deviation
			117,77	23	7,8,8	0:20:00		
			118,14	21	7,8,8	0:20:00		
75	0,2	0,1	126,51	0	7,8,8	0:20:00	123,31	7,18
			132,46	58	7,8,8	0:20:00		
			127,18	0	7,8,8	0:20:00		
			112,27	0	7,8,8	0:20:00		
			118,11	0	7,8,8	0:20:00		
75	0,2	0,15	122,13	0	7,8,8	0:20:00	113,99	7,75
			109,45	0	7,8,8	0:20:00		
			111,35	20	7,8,8	0:20:00		
			103,36	0	7,8,8	0:20:00		
			123,64	0	7,8,8	0:20:00		
75	0,4	0,05	135,27	0	7,8,8	0:20:00	125,15	10,30
			115,62	0	7,8,8	0:20:00		
			117,68	16	7,8,8	0:20:00		
			139,94	0	7,8,8	0:20:00		
			117,25	12	7,8,8	0:20:00		
75	0,4	0,1	122,29	21	7,8,8	0:20:00	127,36	3,65
			124,02	16	7,8,8	0:20:00		
			129,12	0	7,8,8	0:20:00		
			129,17	0	7,8,8	0:20:00		
			132,18	0	7,8,8	0:20:00		
75	0,4	0,15	131,51	0	7,8,8	0:20:00	129,73	5,71
			138,11	0	7,8,8	0:20:00		
			120,39	0	7,8,8	0:20:00		
			130,38	0	7,8,8	0:20:00		
			128,25	20	7,8,8	0:20:00		
75	0,6	0,05	122,87	0	7,8,8	0:20:00	121,74	4,49
			113,08	0	7,8,8	0:20:00		
			122,37	22	7,8,8	0:20:00		
			125,40	49	7,8,8	0:20:00		
			124,99	34	7,8,8	0:20:00		
75	0,6	0,1	120,32	0	7,8,8	0:20:00	119,21	10,85
			107,20	0	7,8,8	0:20:00		
			106,47	28	7,8,8	0:20:00		
			131,92	23	7,8,8	0:20:00		
			130,15	0	7,8,8	0:20:00		
75	0,6	0,15	125,40	0	7,8,8	0:20:00	129,63	5,29
			136,66	0	7,8,8	0:20:00		
			135,50	0	7,8,8	0:20:00		
			125,65	21	7,8,8	0:20:00		
			124,92	0	7,8,8	0:20:00		



Σχήμα 4.2: Διαδρομές του δικτύου με προορισμό τον σταθμό Δάφνης



Σχήμα 4.3: Διαδρομές του δικτύου με προορισμό τον σταθμό Αγίου Ιωάννη



Σχήμα 4.4: Διαδρομές του δικτύου με προορισμό τον σταθμό Αγίου Δημητρίου

Πίνακας 4.6: Υπόμνημα Δικτύου με προορισμό τον Σταθμό Δάφνη

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ	ΧΡΩΜΑ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ	ΑΛΛΗΛΟΥΧΙΑ ΣΤΑΣΕΩΝ
1		ΑΙΝΟΥ-ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ-ΣΧΟΛΕΙΟ-ΑΡΣΑΚΕΙΟ-ΑΓΙΑ ΦΩΤΕΙΝΗ-ΣΤΑΘΜΟΣ ΔΑΦΝΗ
2		6Η ΑΙΓΑΙΟΥ-8Η ΑΡΤΑΚΗΣ-ΣΤΑΘΜΟΣ ΔΑΦΝΗ
3		ΜΟΥΡΙΚΗ-ΙΑΣΩΝΟΣ-ΣΤΑΘΜΟΣ ΔΑΦΝΗ
4		ΛΟΥΤΡΑ-ΣΤΑΘΜΟΣ ΔΑΦΝΗ
5		ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ-ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ-ΣΤΑΘΜΟΣ ΔΑΦΝΗ
6		ΠΑΝΑΓΙΤΣΑ-10Η ΑΡΤΑΚΗΣ-3Η ΠΑΠΑΓΟΥ-ΣΤΑΘΜΟΣ ΔΑΦΝΗ
7(ΠΡΟΣΘΕΤΗ)		ΣΤΑΘΜΟΣ ΔΑΦΝΗ-8Η ΑΡΤΑΚΗΣ-ΛΟΥΤΡΑ-ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ-ΣΤΑΘΜΟΣ ΔΑΦΝΗ

Πίνακας 4.7: Υπόμνημα Δικτύου με προορισμό τον Σταθμό Αγίου Ιωάννη

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ	ΧΡΩΜΑ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ	ΑΛΛΗΛΟΥΧΙΑ ΣΤΑΣΕΩΝ
1		ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ-ΣΧΟΛΕΙΟ-ΠΑΝΑΓΙΤΣΑ-ΣΤΑΘΜΟΣ ΑΓΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
2		ΑΓΙΑ ΦΩΤΕΙΝΗ-8Η ΑΡΤΑΚΗΣ-ΣΤΑΘΜΟΣ ΑΓΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
3		ΜΟΥΡΙΚΗ-ΛΟΥΤΡΑ-ΣΤΑΘΜΟΣ ΑΓΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
4		ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ-ΙΑΣΩΝΟΣ-ΣΤΑΘΜΟΣ ΑΓΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
5		ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ-10Η ΑΡΤΑΚΗΣ-ΣΤΑΘΜΟΣ ΑΓΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
6		ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ-3Η ΠΑΠΑΓΟΥ-ΣΤΑΘΜΟΣ ΑΓΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
7		6Η ΑΙΓΑΙΟΥ-ΑΙΝΟΥ-ΣΤΑΘΜΟΣ ΑΓΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
8(ΠΡΟΣΘΕΤΗ)		ΣΤΑΘΜΟΣ ΑΓΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ-ΠΑΝΑΓΙΤΣΑ-8Η ΑΡΤΑΚΗΣ-ΛΟΥΤΡΑ-ΣΤΑΘΜΟΣ ΑΓΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Πίνακας 4.8: Υπόμνημα Δικτύου με προορισμό τον Σταθμό Αγίου Δημητρίου

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ	ΧΡΩΜΑ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ	ΑΛΛΗΛΟΥΧΙΑ ΣΤΑΣΕΩΝ
1		ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ-ΙΑΣΩΝΟΣ-ΣΤΑΘΜΟΣ ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
2		ΠΑΝΑΓΙΤΣΑ-10Η ΑΡΤΑΚΗΣ-ΣΤΑΘΜΟΣ ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
3		3Η ΠΑΠΑΓΟΥ-ΛΟΥΤΡΑ-ΣΤΑΘΜΟΣ ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
4		ΑΓΙΑ ΦΩΤΕΙΝΗ-ΜΟΥΡΙΚΗ-ΣΧΟΛΕΙΟ-ΣΤΑΘΜΟΣ ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
5		6Η ΑΙΓΑΙΟΥ-ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ-ΑΙΝΟΥ-ΣΤΑΘΜΟΣ ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
6		ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ-8Η ΑΡΤΑΚΗΣ-ΣΤΑΘΜΟΣ ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
7		ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ-ΣΤΑΘΜΟΣ ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
8		ΣΤΑΘΜΟΣ ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ-ΙΑΣΩΝΟΣ-10Η ΑΡΤΑΚΗΣ-ΑΙΝΟΥ-8Η ΑΡΤΑΚΗΣ-ΣΤΑΘΜΟΣ ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

4.4 ΜΕΓΕΘΟΣ ΣΤΟΛΟΥ

Αντικείμενο αυτού του κεφαλαίου είναι να προσδιοριστεί το ελάχιστο απαιτούμενο μέγεθος στόλου λεωφορείων για τη λειτουργία του δικτύου. Για να ελαχιστοποιηθεί ο στόλος, θεωρούμε πως όλοι οι επιβάτες εξυπηρετούνται από το κύριο δίκτυο λεωφορείων και δε μένει κανένας ανικανοποίητος, έτσι ώστε να μην απαιτούνται οι συμπληρωματικές διαδρομές που προσθέτονται σε αυτή την περίπτωση. Επομένως, με βάση τη βέλτιστη λύση που βρέθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο ελάχιστος αριθμός λεωφορείων που απαιτούνται για την κάλυψη του δικτύου παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.9: Μέγεθος στόλου

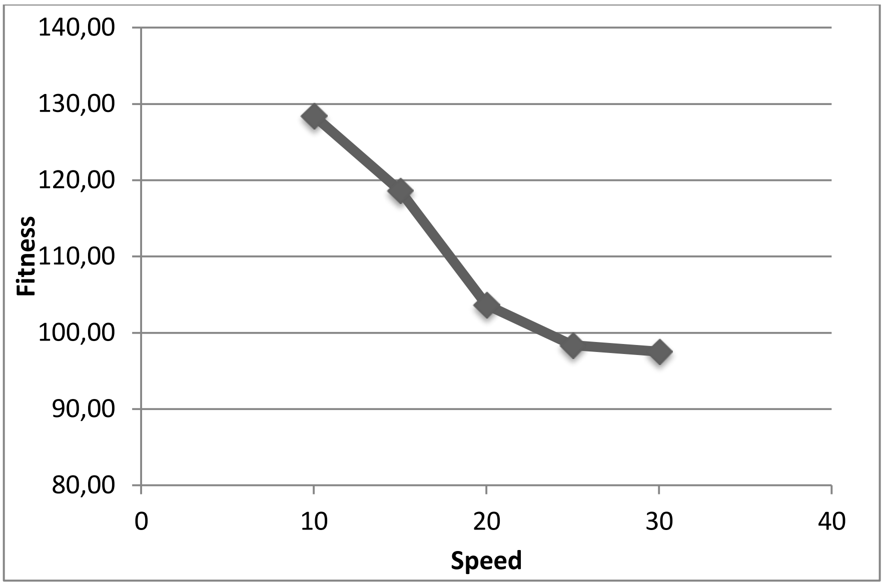
Διαδρομή	Απαιτούμενα λεωφορεία	Σύνολο στόλου
1	6	20
2	7	
3	7	

4.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

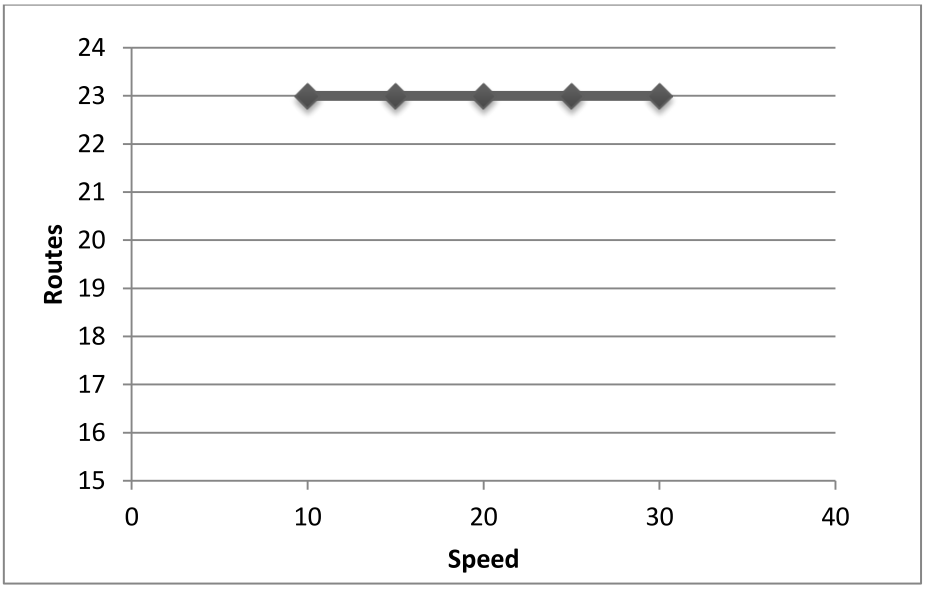
Εφόσον βρέθηκε η λύση που επιλύει με το βέλτιστο τρόπο το πρόβλημα, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας για αυτή τη λύση. Οι παράμετροι με τις οποίες εφαρμοστεί η ανάλυση είναι η ταχύτητα κίνησης του λεωφορείου, η χωρητικότητα του και η ζήτηση για τη χρήση του δικτύου.

4.5.1 Ταχύτητα κίνησης λεωφορείων

Όπως είναι λογικό η μεταβολή της ταχύτητας των λεωφορείων επηρεάζει την συνάρτηση ικανότητας, με αύξηση αυτής να μειώνει τη συνάρτηση, αφού μειώνεται ο χρόνος διαδρομής, και μείωση της ταχύτητας να την αυξάνει. Όπως παρατηρείται όμως από τα αποτελέσματα της ανάλυσης, η μεταβολή της ταχύτητας δεν επηρεάζει τον αριθμό των διαδρομών που απαιτούνται, καθώς ουσιαστικά το μόνο που συμβαίνει είναι να αυξάνεται ή να μειώνεται ο χρόνος διαδρομής, με ανάλογη μείωση ή αύξηση της ταχύτητας των λεωφορείων. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό καθώς, εφόσον δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός για τη χρονική διάρκεια των διαδρομών, ο αριθμός των διαδρομών επηρεάζεται μόνο από τη χωρητικότητα του λεωφορείου, ή από μεταβολή του αριθμού της ζήτησης για χρήση του δικτύου, όπως θα φανεί στη συνέχεια.



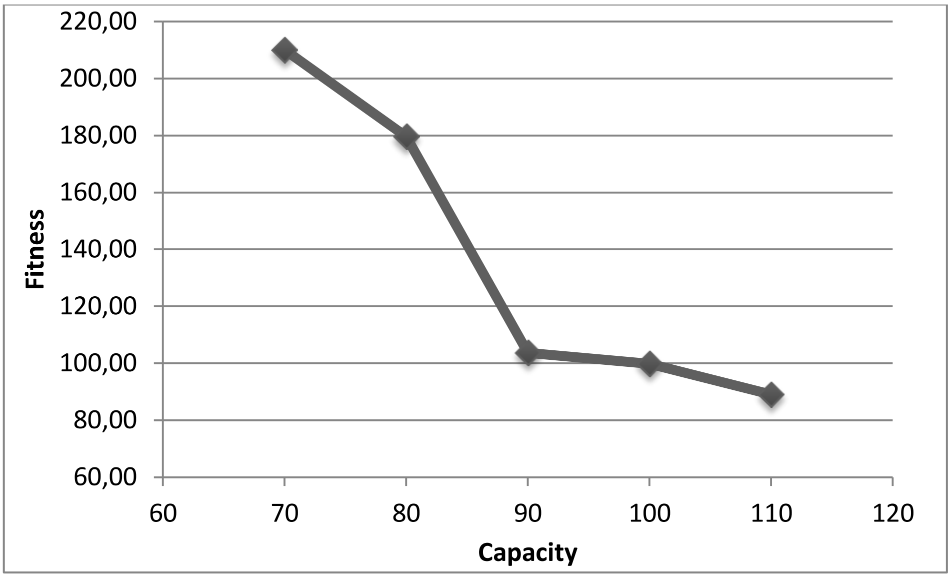
Σχήμα 4.5: Μεταβολή της συνάρτησης ικανότητας σε σχέση με την ταχύτητα κίνησης



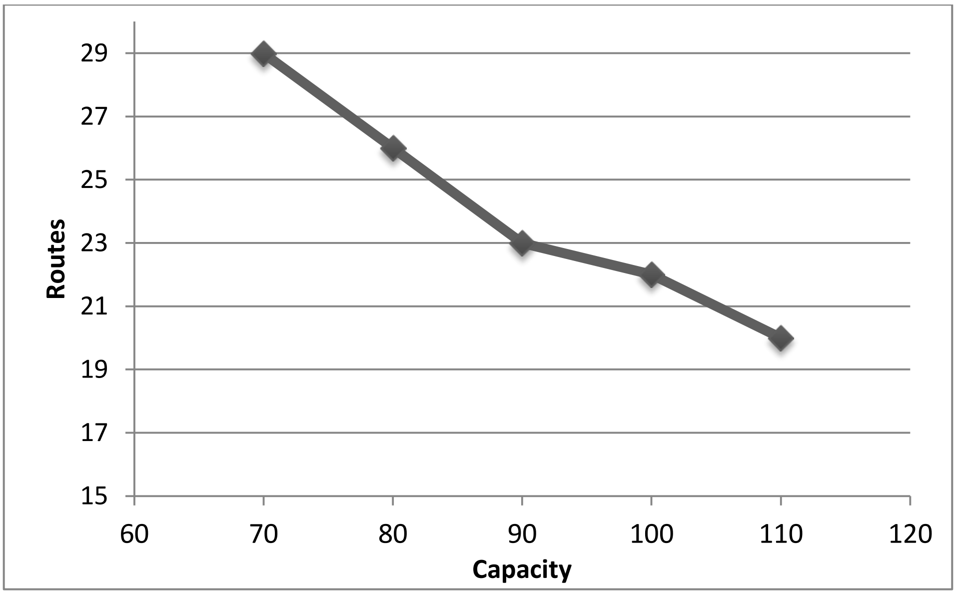
Σχήμα 4.6: Μεταβολή του αριθμού των διαδρομών σε σχέση με την ταχύτητα κίνησης

4.5.2 Χωρητικότητα λεωφορείων

Από την ανάλυση ευαισθησίας ως προς τη χωρητικότητα των οχημάτων παρατηρείται πως με αύξηση της χωρητικότητας, μειώνεται η τιμή της συνάρτησης ικανότητας και αντίστροφα, κάτι επίσης λογικό. Αντίστοιχη μεταβολή υπάρχει και για τον αριθμό των διαδρομών που απαιτούνται για τη λειτουργία του δικτύου, καθώς, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο αριθμός των διαδρομών επηρεάζεται από τη χωρητικότητα των οχημάτων.



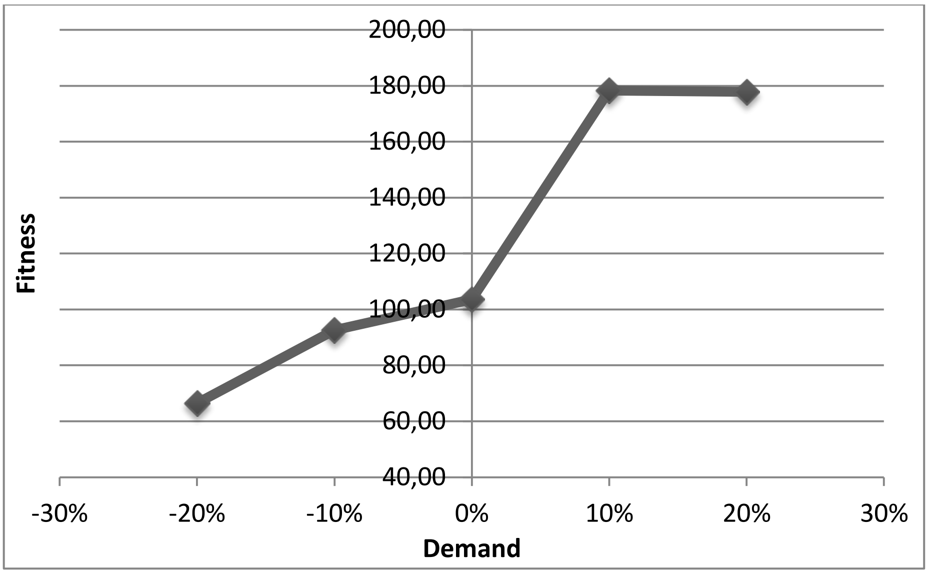
Σχήμα 4.7: Μεταβολή της συνάρτησης ικανότητας σε σχέση με τη χωρητικότητα



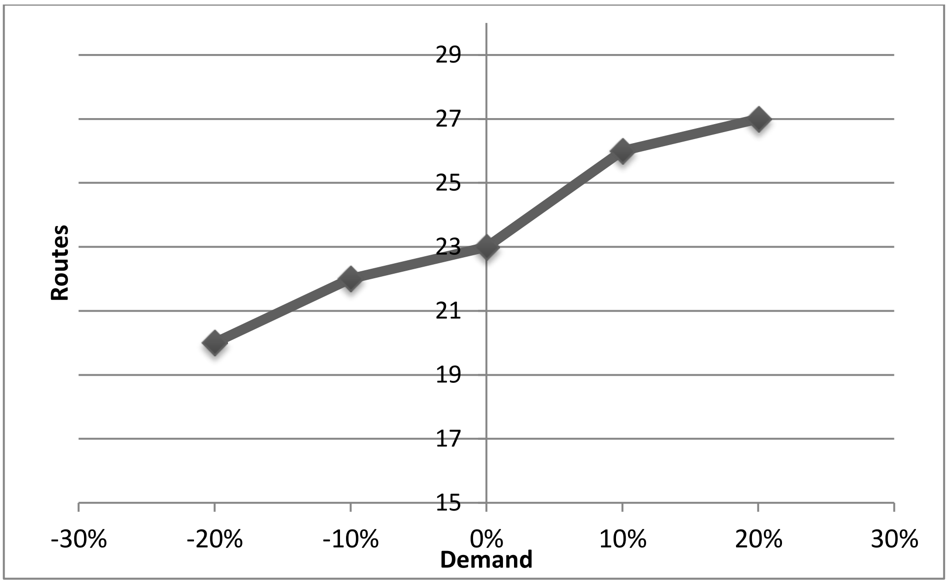
Σχήμα 4.8: Μεταβολή του αριθμού των διαδρομών σε σχέση με τη χωρητικότητα

4.5.3 Ζήτηση

Τέλος, τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας με μεταβολή της ζήτησης από τους επιβάτες για χρήση του δικτύου έδειξαν πως μείωση του αριθμού των ατόμων που επιθυμούν να χρησιμοποιήσουν τα λεωφορεία οδηγεί σε μείωση τόσο της αντικειμενικής συνάρτησης όσο και του αριθμού των διαδρομών που απαιτούνται και αντίθετα αύξηση του αριθμού οδηγεί σε αύξηση αυτών των παραμέτρων, όπως και αναμενόταν.



Σχήμα 4.9: Μεταβολή της συνάρτησης ικανότητας σε σχέση με τη ζήτηση



Σχήμα 4.10: Μεταβολή του αριθμού των διαδρομών σε σχέση με τη ζήτηση

4.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.6.1 Παράμετροι του γενετικού αλγόριθμου

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου στο πρόβλημα έδειξαν πως η επιλογή των συντελεστών για τις παραμέτρους πληθυσμού, διασταύρωσης και μετάλλαξης παίζει σημαντικό ρόλο καθώς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα. Έτσι, στο συγκεκριμένο πρόβλημα πιο αποδοτικός θεωρήθηκε ο συντελεστής 25 για τον πληθυσμό και γενικότερα όπως αποτυπώθηκε στα αποτελέσματα οι μικρότεροι συντελεστές 25 και 50 έδωσαν καλύτερα αποτελέσματα από τον συντελεστή πληθυσμού 75. Αισθητές μεταβολές στη συνάρτηση ικανότητας παρατηρούνται επίσης με τις διαφορετικές τιμές του συντελεστή διασταύρωσης, με την τιμή 0.2 να παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα από τις υπόλοιπες για κάθε διαφορετικό πληθυσμό. Τέλος, η τιμή του συντελεστή μετάλλαξης που δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα είναι το 0.05, οι μεταβολές του οποίου επίσης επιφέρουν διακυμάνσεις στη συνάρτηση ικανότητας, με σχετικά μεγάλη διαφορά σε σχέση με τον συντελεστή 0.05 και τους υπόλοιπους.

4.6.2 Ανάλυση ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε με βάση το καλύτερο αποτέλεσμα του αλγορίθμου έδειξε πως η συνάρτηση ικανότητας είναι ευαίσθητη σε αλλαγές στην ταχύτητα κίνησης, τη χωρητικότητα και τη ζήτηση.

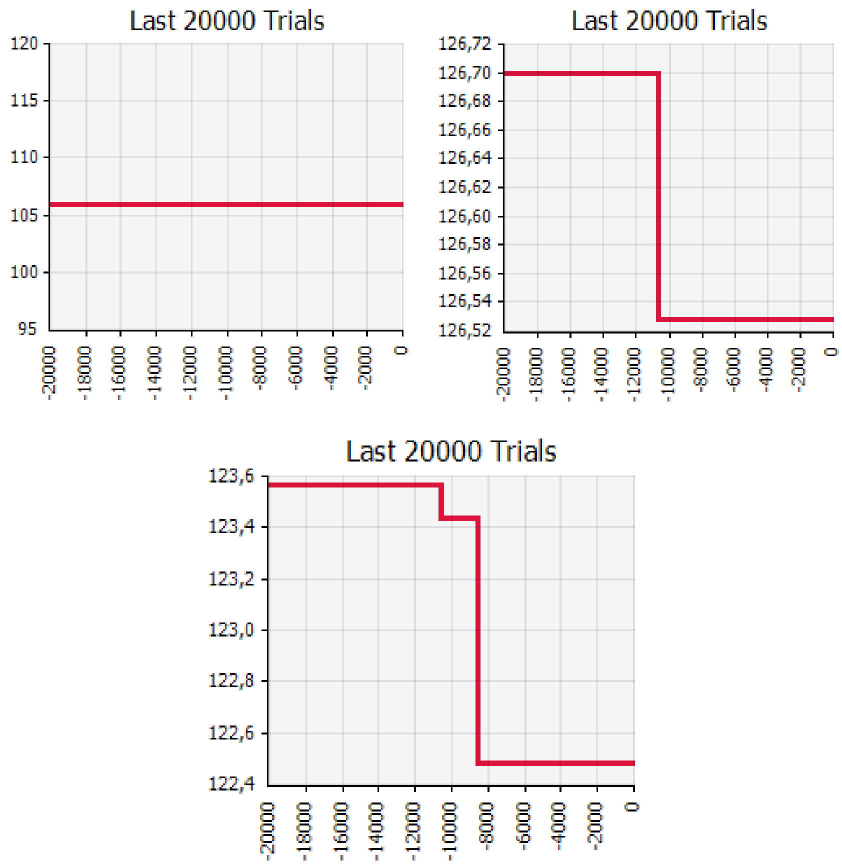
Αρχικά η μεταβολή της ταχύτητας κίνησης των λεωφορείων έχει ως αποτέλεσμα και αντίστοιχη μεταβολή της συνάρτησης ικανότητας. Αυτή η μεταβολή οφείλεται στο ότι, όπως είναι προφανές, αύξηση της ταχύτητας κίνησης οδηγεί σε μείωση του χρόνου διαδρομής και αντίστροφα. Παρατηρείται όμως πως ο αριθμός των διαδρομών που απαιτούνται για την λειτουργία του δικτύου δεν επηρεάζεται από τις αλλαγές στην ταχύτητα οπότε η συνάρτηση ικανότητας μεταβάλλεται μόνο λόγω των μεταβολών στους χρόνους διαδρομής.

Αντίθετα, η ανάλυση έδειξε πως η δεύτερη παράμετρος που εξετάστηκε, της χωρητικότητας των οχημάτων, επηρεάζει τη συνάρτηση ικανότητας και μέσω των διαδρομών που απαιτούνται, καθώς μεταβολές αυτής επιφέρουν και μεταβολές του απαιτούμενου αριθμού διαδρομών. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό καθώς αλλαγές στη χωρητικότητα των οχημάτων σημαίνουν αλλαγές στον αριθμό των επιβατών που μπορεί να καλύψει κάθε λεωφορείο, έτσι, για παράδειγμα αν θεωρηθεί πως η ζήτηση για χρήση του δικτύου παραμένει σταθερή, μείωση της χωρητικότητας σημαίνει πως χρειάζονται περισσότερα λεωφορεία από πριν για να εξυπηρετήσουν.

Αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν από την ανάλυση ευαισθησίας σε σχέση με τη ζήτηση για χρήση των οχημάτων. Μείωση της ζήτησης οδηγεί σε μείωση της συνάρτησης ικανότητας και αντίστροφα. Όμοια με το προηγούμενο παράδειγμα, με σταθερή τη χωρητικότητα των οχημάτων, αύξηση της ζήτησης σημαίνει πως ο αρχικός αριθμός λεωφορείων δεν επαρκεί για να την καλύψει, έτσι απαιτούνται περισσότερα. Αυτό συνεπώς επιφέρει αύξηση στη συνάρτηση ικανότητας.

4.6.3 Σύγκλιση του αλγόριθμου

Οι μικρές σχετικά διαφορές που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της εφαρμογής του γενετικού αλγορίθμου ακόμα και για τις διαφορετικές παραμέτρους του οδηγούν στο συμπέρασμα πως έχει αποφευχθεί εγκλωβισμός σε κάποιο τοπικό βέλτιστο, ή όπως λέμε ο αλγόριθμος συγκλίνει. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις που ο αλγόριθμος, όταν εντοπίζει μια σχετικά «καλή» λύση σταματάει εκεί, ή όπως αναφέρεται συγκλίνει πρώιμα. Αυτή η «παγίδευση» του αλγορίθμου σε κάποιο τοπικό ελάχιστο έχει ως αποτέλεσμα ακόμα και για τον ίδιο συνδυασμό παραμέτρων του γενετικού την ύπαρξη σημαντικών διαφορών στην αντικειμενική συνάρτηση. Παρακάτω παρατίθενται κάποια αντιπροσωπευτικά παραδείγματα για συνδυασμό παραμέτρων πληθυσμού, διασταύρωσης, μετάλλαξης 50,0.2,0.05 αντίστοιχα όπου ο αλγόριθμος εγκλωβίζεται σε κάποιο τοπικό ελάχιστο και συγκλίνει εκεί, παρουσιάζοντας σημαντικές διαφορές στην αντικειμενική συνάρτηση.



Σχήμα 4.11: Μεταβολές στη σύγκλιση σε διαφορετικές επαναλήψεις

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

5.1 ΣΥΝΟΨΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός δικτύου τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείων, με εφαρμογή του μοντέλου σε τρεις σταθμούς μετρό της Αθήνας. Με τον όρο τροφοδοτικές γραμμές δηλώνονται διαδρομές οι οποίες έχουν ως στόχο τη σύνδεση μιας περιοχής με έναν ή περισσότερους σταθμούς μέσων σταθερής τροχιάς.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε μια εκτενής περιγραφή των ήδη υπαρχόντων εργασιών που ασχολούνται με το πρόβλημα του σχεδιασμού δικτύου τροφοδοτικών γραμμών στη διεθνή βιβλιογραφία. Ακόμη περιγράφηκαν τα συστήματα «Demand Responsive Transport» τα οποία αποτέλεσαν τη μεθοδολογία με την οποία ικανοποιείται η ζήτηση για τη χρήση του δικτύου.

Στο επόμενο κεφάλαιο διατυπώθηκε μαθηματικά το πρόβλημα και επεξηγήθηκε η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί που τέθηκαν. Στόχος της συνάρτησης είναι η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του χρόνου μετακίνησης, του αριθμού των διαδρομών και του αριθμού των επιβατών που δεν εξυπηρετούνται κατά τη λειτουργία του δικτύου. Ύστερα πραγματοποιήθηκε μια αναλυτική περιγραφή των γενετικών αλγορίθμων, όσο αναφορά τον τρόπο λειτουργίας τους, τις βασικές παραμέτρους τους αλλά και τα πλεονεκτήματα τους. Επιπρόσθετα παρουσιάστηκε ο γενετικός αλγόριθμος που κατασκευάστηκε για να επιλύσει το συγκεκριμένο πρόβλημα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο εφαρμόστηκε ο γενετικός αλγόριθμος που κατασκευάστηκε με τα δεδομένα μιας περιοχής της Αθήνας με στόχο τη σύνδεση της με τρεις διαφορετικούς σταθμούς Μετρό. Αφού παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του αλγορίθμου για διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων του και τελικά το βέλτιστο δίκτυο που επιλύει το πρόβλημα, πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση ευαισθησίας με βάση τη βέλτιστη λύση ως προς τρεις παράγοντες: την ταχύτητα κίνησης, τη χωρητικότητα των λεωφορείων και της ζήτησης για χρήση του δικτύου.

Τέλος, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας και κάποιες προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση και ανάλυση του προβλήματος.

5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το αντικείμενο της εργασίας αποτελεί ένα θέμα που μελετάται αρκετά από την επιστημονική κοινότητα ειδικά τα τελευταία χρόνια, καθώς βελτιώνει σε μεγάλο βαθμό τη λειτουργία και την αποτελεσματικότητα των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς. Η μεγάλη διαφορά όμως της παρούσας εργασίας από τις προγενέστερες, που την καθιστά και αρκετά πιο απαιτητική, είναι πως λαμβάνει υπόψη τη ζήτηση για χρήση του δικτύου κάθε στιγμή και δε χρησιμοποιεί προκαθορισμένες συχνότητες για τα δρομολόγια, καθώς επίσης πως σε αντίθεση με τις περισσότερες παρόμοιες έρευνες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περισσότερους από έναν προορισμούς (σταθμούς σταθερής τροχιάς) ταυτόχρονα. Ακόμη, λαμβάνει υπόψη εκτός από τις απαιτήσεις των επιβατών, το οικονομικό συμφέρον των συγκοινωνιακών φορέων αλλά και τους περιορισμούς χωρητικότητας των οχημάτων.

Ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε ρεαλιστικές συνθήκες σε δίκτυο της Αθήνας και από τα αποτελέσματα που προέκυψαν και τον μικρό υπολογιστικό χρόνο που απαιτήθηκε, διαπιστώθηκε πως μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί από αρμόδιους φορείς για τη δρομολόγηση λεωφορείων. Στο μεγαλύτερο ποσοστό των λύσεων εξυπηρετείται όλη η ζήτηση για χρήση του δικτύου στο σύνολο της, με σχετικά μικρό αριθμό οχημάτων να απαιτούνται. Έτσι ο αλγόριθμος δίνει αποδεκτά αποτελέσματα που καλύπτουν τις ανάγκες και των επιβατών και των φορέων μεταφορών.

Η ευελιξία του αλγόριθμου που δημιουργήθηκε, άλλα και ο σχετικά μικρός υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται, και επιτρέπει την εκτέλεση του πολλές φορές με τα δεδομένα, δίνει τη δυνατότητα άμεσης εύρεσης των βέλτιστων διαδρομών.

Κάτι τέτοιο τον καθιστά ελκυστικό, καθώς οι περισσότερες προσεγγίσεις του προβλήματος περιλαμβάνουν πολυεπίπεδη βελτιστοποίηση, η οποία απαιτεί περισσότερο χρόνο και έρευνα.

5.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Όπως διαπιστώθηκε από την παρούσα εργασία, δεν υπάρχει κάποιος μοναδικός τρόπος ή κάποια προϋπόθεση που πρέπει να τηρείται κατά την επίλυση του προβλήματος σχεδιασμού δικτύου τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείων. Έτσι, στη συγκεκριμένη μελέτη, είναι δυνατόν να εφαρμοστούν πολλές μετατροπές ή παραλλαγές στις οποίες μπορεί να βασιστεί μελλοντική έρευνα ώστε να βελτιώσει και να επεκτείνει το πρόβλημα.

5.3.1 Παραλλαγές στην αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος λήφθηκε ίση με το άθροισμα τριών μεταβλητών: του συνολικού χρόνου διαδρομής, της μη εξυπηρετούμενης ζήτησης και του αριθμού των απαιτούμενων διαδρομών. Είναι όμως εφικτό να εισαχθούν περισσότερες μεταβλητές στην αντικειμενική συνάρτηση, όπως για παράδειγμα διαφορετικοί τύποι των λεωφορείων, όπως παραδείγματος χάρη διαφορετικής χωρητικότητας, που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες ή διάφορες ποινές που θα μπορούσαν να τεθούν αν ο συνολικός χρόνος διαδρομής ή ο αριθμός μη εξυπηρετούμενων επιβατών υπερβούν κάποιο όριο.

Όσο αφορά τους περιορισμούς θα μπορούσε να εισαχθεί συγκεκριμένος αριθμός διαθέσιμου στόλου οχημάτων ώστε ο συνολικός αριθμός οχημάτων που θα χρησιμοποιηθούν να μην τον ξεπερνά ή κάποιο συγκεκριμένο μέγιστο μήκος που θα πρέπει να έχουν οι διαδρομές του δικτύου.

5.3.2 Παραλλαγές στον αλγόριθμο επίλυσης

Όπως έγινε αντιληπτό από το δεύτερο κεφάλαιο, πολλές διαφορετικές μεθοδολογίες και αλγόριθμοι έχουν χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του προβλήματος. Στις περισσότερες από αυτές χρησιμοποιείται μια ευριστική ή μεταευριστική μέθοδος, οι οποίες θεωρούνται επαρκείς και αποτελεσματικές για να επιλύσουν τέτοιου είδους προβλήματα. Υπάρχουν και άλλες μεθοδολογίες όμως που παρουσιάζουν πολλές προοπτικές και θα ήταν χρήσιμο να εξερευνηθούν περισσότερο, όπως για παράδειγμα υβριδικές μέθοδοι ή μέθοδοι που βασίζονται στη νοημοσύνη σμήνους (swarm intelligence).

Ακόμα όμως υπάρχουν και πολλές μετατροπές που μπορούν να πραγματοποιηθούν στον αλγόριθμο που κατασκευάστηκε σε αυτή την εργασία, ώστε να τον κάνουν ακόμη πιο αποτελεσματικό. Για παράδειγμα, είναι πιθανό η αρχική λύση που παράγεται τυχαία από τον αλγόριθμο να επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα. Έτσι, πιθανόν τα αποτελέσματα του αλγορίθμου αλλά και οι υπολογιστικοί χρόνοι να βελτιωθούν ακόμη περισσότερο αν οι αρχικοί πληθυσμοί δεν παράγονται τυχαία, αλλά μέσω μιας ευριστικής μεθόδου.

Τέλος, θα παρουσίαζε ενδιαφέρον να ερευνούνταν και διαφορετικοί τρόποι-κριτήρια για τη διακοπή της διαδικασίας των επαναλήψεων του αλγορίθμου, όπως για παράδειγμα ένα κριτήριο του ποσοστού της μεταβολής του αποτελέσματος σε κάποιον ορισμένο χρόνο. Κάτι τέτοιο πιθανώς να έλυνε και το πρόβλημα της πρώιμης σύγκλισης του αλγορίθμου, ωστόσο κατά πάσα πιθανότητα θα απαιτούσε περισσότερο υπολογιστικό χρόνο.

5.3.3 Προτάσεις για επέκταση του προβλήματος

Ο τρόπος που επιλύθηκε το πρόβλημα χαρακτηρίζεται από μεγάλη ευελιξία. Έτσι μπορεί εύκολα να βελτιωθεί και να εξελιχθεί, καλύπτοντας ακόμη καλύτερα τις ανάγκες που το περιγράφουν αλλά και διαφορετικές που μπορεί να προκύψουν.

Αρχικά, στη μελέτη επιλύθηκε το πρόβλημα για 15 στάσεις λεωφορείου και 3 προορισμούς -σταθμούς μετρό. Ο τρόπος όμως που δομήθηκε το πρόβλημα επιτρέπει να γίνουν αλλαγές ώστε να μπορεί να αντιμετωπίσει δίκτυα μεγαλύτερου ή μικρότερου μεγέθους.

Ακόμη, μια ενδιαφέρουσα προοπτική για το πρόβλημα θα ήταν να αποβιβάζονται επιβάτες σε οποιαδήποτε από τις στάσεις του δικτύου. Στο πρόβλημα μας θεωρήσαμε ότι όλη η ζήτηση για χρήση του δικτύου είναι προς τους σταθμούς μετρό. Με κατάλληλες μετατροπές όμως στα μητρώα Προέλευσης-Προορισμού και στον αλγόριθμο είναι εφικτό η ζήτηση να είναι προς όλες τις στάσεις και να εξυπηρετούνται και οι επιβάτες που επιθυμούν να αποβιβαστούν σε μια από τις ενδιάμεσες στάσεις της διαδρομής. Βέβαια, σε αυτή την περίπτωση αλλάζει αρκετά και ο χαρακτήρας του προβλήματος και έγκειται περισσότερο σε πρόβλημα σχεδιασμού δικτύου αστικών συγκοινωνιών (Transit Route Network Design Problem – TRNDP).

Επιπρόσθετα, εφόσον ο λόγος που δημιουργήθηκε αυτή η κατηγορία προβλημάτων είναι για να καθιστά ακόμη πιο λειτουργικά τα δίκτυα Μέσων Μεταφορών και να ενώνει απομακρυσμένες περιοχές με σταθμούς σταθερής τροχιάς, είναι αναγκαίο να εξερευνηθούν τρόποι ώστε η ένωση αυτή να είναι πιο αποτελεσματική. Έτσι θα πρέπει να γίνει μελέτη ώστε τα δρομολόγια των τροφοδοτικών λεωφορείων να συμπίπτουν με αντίστοιχα δρομολόγια μέσων σταθερής τροχιάς ώστε οι χρόνοι αναμονής να είναι οι ελάχιστοι δυνατοί.

Τέλος, μια άλλη κατεύθυνση που θα μπορούσε να κινηθεί η συγκεκριμένη εργασία είναι εκτός από τη δρομολόγηση οχημάτων για εξυπηρέτηση του δικτύου να πραγματοποιούταν και ταυτόχρονη χωροθέτηση στάσεων σε βέλτιστες θέσεις. Έτσι, ανάλογα με το που συγκεντρώνεται το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης της περιοχής θα μπορούσαν να χωροθετηθούν στάσεις λεωφορείου, ώστε το δίκτυο που θα δημιουργηθεί να εξυπηρετεί με ακόμη καλύτερο τρόπο την περιοχή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Almasi, M. H., Mirzapour Mounes, S., Koting, S., & Karim, M. R. (2014). Analysis of feeder bus network design and scheduling problems. The Scientific World Journal, 2014.

Baaj, M. H., & Mahmassani, H. S. (1995). Hybrid route generation heuristic algorithm for the design of transit networks. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 3(1), 31-50.

Blickle, T., and Thiele, L., 1996. “A Comparison of Selection Schemes Used in Evolutionary Algorithms.” Evolutionary Computation 4 (4): 361–394.

Brake, J., Mulley, C., Nelson, J. D., & Wright, S. (2007). Key lessons learned from recent experience with flexible transport services. Transport Policy, 14(6), 458-466.

Chien, S., & Yang, Z. (2000). Optimal feeder bus routes on irregular street networks. Journal of Advanced Transportation, 34(2), 213-248.

Ciaffi, F., Cipriani, E., & Petrelli, M. (2012). Feeder bus network design problem: a new metaheuristic procedure and real size applications. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 54, 798-807.

Davison, L., Enoch, M., Ryley, T., Quddus, M., & Wang, C. (2014). A survey of demand responsive transport in Great Britain. Transport Policy, 31, 47-54.

Deng, L. B., Gao, W., Zhou, W. L., & Lai, T. Z. (2013). Optimal design of feeder-bus network related to urban rail line based on transfer system. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 96, 2383-2394.

Design of a demand-responsive transit system. California PATH Program, Institute of Transportation Studies, University of California at Berkeley, 2007.

Holland,J., “Adaptation in Natural and Artificial Systems”, MIT press 1992

Hu, Y., Zhang, Q., & Wang, W. (2012). A model layout region optimization for feeder buses of rail transit. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 43, 773-780.

Jerby S. and Ceder A. (2006). Optimal routing design for shuttle bus service. Transportation Research Record, 1971, pp. 14-22.

Kuah, G. K., & Perl, J. (1988). Optimization of feeder bus routes and bus-stop spacing. Journal of Transportation Engineering, 114(3), 341-354.

Kuan, S. N., Ong, H. L., & Ng, K. M. (2006). Solving the feeder bus network design problem by genetic algorithms and ant colony optimization. Advances in Engineering Software, 37(6), 351-359.

Laws, R., Enoch, M. P., Ison, S. G., & Potter, S. (2009). Demand responsive transport: a review of schemes in England and Wales.

Litman, T. (2013). Understanding transport demands and elasticities. How prices and other factors affect travel behavior.(Victoria Transport Policy Institute: Litman) Available at http://www. vtpi. org/elasticities. pdf [Verified 22 November 2013].

Mandl, C. E. (1980). Evaluation and optimization of urban public transportation networks. European Journal of Operational Research, 5(6), 396-404.

Martins, C. L., & Pato, M. V. (1998). Search strategies for the feeder bus network design problem. European Journal of Operational Research, 106(2), 425-440.

Montella, B., D’Acierno, L., & Gallo, M. (2007). Transportation network design methods under the assumption of elastic demand. In Proceedings of “11th World Conference on Transport Research”, Berkeley (CA), USA, June2007.

Nelson, J. D., & Romanazzo, M. (2004). Demand responsive transport services: Towards the flexible mobility agency. G. Ambrosino (Ed.). ENEA, Italian National Agency for New Technologies, Energy and the Environment.

O'MAHONY, M. A. R. G. A. R. E. T. (2007). Design of feeder route network using combined genetic algorithm and specialised repair heuristic.

Shrivastava, P., & O'Mahony, M. (2006). A model for development of optimized feeder routes and coordinated schedules—A genetic algorithms approach. Transport policy, 13(5), 413-425.

Toth,P., Vigo,D., 2002. The Vehicle Routing Problem. SIAM.

Tylee, L. (1998). Learn Visual Basic 6.0. Database, 8, 24.

Zhang, J., Lv, B., Tian, G., & Liu, W. (2014). Fare Design in Urban Transit Network considering Elastic Demand and Adverse Weather's Impact. Journal of Applied Mathematics, 2014.

Βαφειάδης Μ. 2005. Συνοπτικός οδηγός της γλώσσας προγραμματισμού Visual Basic. Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος ΑΠΘ.

Γεωργάκης Θ., Κατσάμπαλος Κ. (2008) Οδηγός Προγραμματισμού στο περιβάλλον της VISUAL BASIC 6. ΤΑΤΜ–ΑΠΘ.

Γεωργιλάκης, Π. Σ. (2004). Εφαρμογή γενετικών αλγορίθμων στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τεχνικά Χρονικά, III, 1-2.

Γεωργόπουλος,Ε.Φ., Λυκοθανάσης,Σ.Δ., 1999. "Εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγορίθμους ", Π Πανεπιστήμιο Πατρών,Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών & Πληροφορικής

Καρλαύτης, Μ.Γ., και Λυμπέρης, Κ.Π., 2009, Συστήματα αστικών συγκοινωνιών – Σχεδιασμός, κατασκευή, λειτουργία, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

Καρλαύτης,Μ.Γ., Λαγαρός, Ν.Δ., 2010. Επιχειρησιακή Έρευνα και Βελτιστοποίηση για Μηχανικούς, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα

Λυκοθανάσης, Σ. (2001). Γενετικοί Αλγόριθμοι και Εφαρμογές. Τεχνητή Νοημοσύνη Εφαρμογές.

Μακρόπουλος, Χ., και Ευστρατιάδης, Α., 2011, Γενετικοί Αλγόριθμοι, σειρά διαφανειών, Τομέας υδατικών Πόρων και περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΚΩΔΙΚΑΣ VISUAL BASIC

```
Sub renumb()

For i = 1 To 15

    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 1).Value = i
    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 2).Value = ""
    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 3).Value = ""
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 1).Value = i
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 2).Value = ""
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 3).Value = ""
    Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 1).Value = i
    Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 2).Value = ""
    Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 3).Value = ""
Next i

End Sub

Sub init_pop_gen()

Dim a(15), b(15), c(15) As Integer

For i = 1 To 15
    a(i) = i
    b(i) = 0
Next i

k = 1

While k <= 15
    di = Int(15 * Rnd() + 1)
    For i = 1 To 15
        If (a(i) = di And b(i) = 0) Then
            c(k) = a(i)
            b(i) = 1
            k = k + 1
            Exit For
        End If
    Next i
Wend

For i = 2 To 16
    Worksheets("visual").Cells(i, 1).Value = c(i - 1)
Next i

For i = 1 To 15
    a(i) = i
    b(i) = 0
Next i

k = 1
```

```
While k <= 15
    di = Int(15 * Rnd() + 1)
    For i = 1 To 15
        If (a(i) = di And b(i) = 0) Then
            c(k) = a(i)
            b(i) = 1
            k = k + 1
            Exit For
        End If
    Next i
Wend

For i = 2 To 16
    Worksheets("visual2").Cells(i, 1).Value = c(i - 1)
Next i

For i = 1 To 15
    a(i) = i
    b(i) = 0
Next i

k = 1

While k <= 15
    di = Int(15 * Rnd() + 1)
    For i = 1 To 15
        If (a(i) = di And b(i) = 0) Then
            c(k) = a(i)
            b(i) = 1
            k = k + 1
            Exit For
        End If
    Next i
Wend

For i = 2 To 16
     Worksheets("visual3").Cells(i, 1).Value = c(i - 1)
Next i

End Sub

Sub getroutes()
Dim servt(15) As Single, d(15) As Single, pen() As Double,
unserv(15) As Integer, NodesUnsLine(15) As Integer, ind2(15) As
Integer, srpos(), srpos2(), tot1(), tot2() As Single
Dim an(15), ind(15) As Integer, tb(15) As Single, ss(15) As
Single, tot99() As Single, NodesUns(15) As Integer, NodesUns3(15)
As Integer, st(15) As Single, UnsDemNod(15) As Integer


For i = 2 To 16
    getnew = Worksheets("visual").Cells(i, 1).Value
    For j = 20 To 34
       check = Worksheets("visual").Cells(j, 1).Value

        If check = getnew Then
           an(i - 1) = Worksheets("visual").Cells(j, 1).Value
           st(i - 1) = Worksheets("visual").Cells(j, 2).Value
```

```
            tb(i - 1) = Worksheets("visual").Cells(j, 3).Value
            d(i - 1) = Worksheets("demand").Cells(j - 16, 3).Value
            End If
         Next j
Next i

cap = Worksheets("visual").Cells(38, 2).Value
Total = 0
rtnum = 1
stopit = 0
i = 1
ID = 1
NodesUnsIn = 0

While Not stopit = 1

Total = Total + d(i)

If Total < cap Then
    free = cap - Total
    unserv(i) = 0
    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 5).Value = free
    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 6).Value = 0
    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 7).Value = 0
    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 8).Value = unserv(i)
    ind(i) = rtnum
    i = i + 1
End If

If Total = cap Then
    unserv(i) = 0
    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 5).Value = 0
    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 6).Value = 0
    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 7).Value = 0
    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 8).Value = unserv(i)
    ind(i) = rtnum
    rtnum = rtnum + 1
    Total = 0
    i = i + 1
    ID = i
End If

If Total > cap Then

    free = cap - (Total - d(i))
    unserv(i) = d(i) - free
    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 5).Value = 0
    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 6).Value = unserv(i)
    NodesUnsIn = NodesUnsIn + 1
    NodesUns(NodesUnsIn) = an(i)
    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 7).Value =
NodesUns(NodesUnsIn)
    NodesUnsLine(NodesUnsIn) = i
    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 8).Value = unserv(i)
    ind(i) = rtnum
    rtnum = rtnum + 1
    Total = 0
    i = i + 1
```

```
    ID = i
End If

If i > 15 Then stopit = 1

Wend

For i = 1 To 15
    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 3).Value = ind(i)
Next i

If NodesUnsIn <> 0 Then
    Total2 = 0
    rtnum = rtnum + 1
    extraroutes = 1
    i = 1
    While i <= NodesUnsIn
        Total2 = Total2 + unserv(NodesUnsLine(i))

        If Total2 < cap Then
            free2 = cap - Total2
            Worksheets("visual").Cells(i + 1, 9).Value = Total2
            Worksheets("visual").Cells(i + 1, 10).Value = free2
            Worksheets("visual").Cells(i + 1, 11).Value = 0
            Worksheets("visual").Cells((NodesUnsLine(i)) + 1,
12).Value = rtnum
            ind2(i) = rtnum
            Worksheets("visual").Cells(i + 1, 13).Value = ind2(i)
            i = i + 1

        ElseIf Total2 = cap Then
            free2 = 0
            Worksheets("visual").Cells(i + 1, 9).Value = Total2
            Worksheets("visual").Cells(i + 1, 10).Value = free2
            Worksheets("visual").Cells(i + 1, 11).Value = 0
            Worksheets("visual").Cells((NodesUnsLine(i)) + 1,
12).Value = rtnum
            ind2(i) = rtnum
            Worksheets("visual").Cells(i + 1, 13).Value = ind2(i)
            i = i + 1

        ElseIf Total2 > cap Then
            free2 = 0
            Total2 = 0
            rtnum = rtnum + 1
            extraroutes = extraroutes + 1
            Worksheets("visual").Cells(i + 1, 9).Value = Total2
            Worksheets("visual").Cells(i + 1, 10).Value = free2
            Worksheets("visual").Cells(i + 1, 11).Value =
unserv(NodesUnsLine(i))
            Worksheets("visual").Cells((NodesUnsLine(i)) + 1,
12).Value = rtnum
            ind2(i) = rtnum
            Worksheets("visual").Cells(i + 1, 13).Value = ind2(i)
            i = i + 1

        End If
```

```
Wend
End If

basicroutes = rtnum – extraroutes

For i = 1 To 15
    ReDim srpos(rtnum + 1), pen(rtnum)
    counter = 0
    ind(0) = 0
Next i

For i = 1 To 15
    If ind(i - 1) < ind(i) Then
        counter = counter + 1
        srpos(counter) = i
        basicroutes = counter
    End If
    Worksheets("visual").Cells(i, 18).Value = srpos(counter)
Next i
srpos(basicroutes + 1) = 16
tot = 0

ReDim tot1(basicroutes + 1), srpos2(extraroutes + 1),
tot2(extraroutes + 1)
srpos2(extraroutes + 1) = NodesUnsIn + 1

For i = 1 To basicroutes
    a = srpos(i)
    b = srpos(i + 1) - 1
    dist = 0
    dist0a = tb(a)
    distb0 = Worksheets("times").Cells(3 + b, 18).Value
    For j = a To (b - 1)
        dist = dist + Worksheets("times").Cells(3 + an(j), 2 +
an(j + 1)).Value + st(j)
    Next j

    tot1(i) = dist + st(b) + dist0a + distb0

Next i
c2 = 0
ind2(0) = 0
For i = 1 To NodesUnsIn
    If ind2(i - 1) < ind2(i) Then
        c2 = c2 + 1
        srpos2(c2) = i
    End If
     Worksheets("visual").Cells(i + 1, 20).Value = srpos2(c2)
Next i

For i = 1 To extraroutes
    a = srpos2(i)
    b = srpos2(i + 1) - 1
    dist = 0
    dist0a = Worksheets("visual").Cells(19 + NodesUns(a),
3).Value
    distb0 = Worksheets("times").Cells(3 + NodesUns(b), 18).Value
    For j = a To (b - 1)
```

```
        dist = dist + Worksheets("times").Cells(3 + NodesUns(j),
2 + NodesUns(j + 1)).Value
    Next j

    tot2(i) = dist + st(b) + dist0a + distb0


Next i
tota = 0
totb = 0

For k = 1 To basicroutes

    tota = tota + tot1(k)
Next k
For k = 1 To extraroutes

    totb = totb + tot2(k)
Next k
un = 0
For i = 1 To 15
    un = un + unserv(i)
Next i

Totalcost1 = tota + totb + un + rtnum
Worksheets("visual").Cells(3, 2).Value = Totalcost1


For i = 2 To 16
     getnew = Worksheets("visual2").Cells(i, 1).Value
     For j = 20 To 34
         check = Worksheets("visual2").Cells(j, 1).Value

         If check = getnew Then
           an(i - 1) = Worksheets("visual2").Cells(j, 1).Value
           st(i - 1) = Worksheets("visual2").Cells(j, 2).Value
           tb(i - 1) = Worksheets("visual2").Cells(j, 3).Value
           d(i - 1) = Worksheets("demand").Cells(j - 16, 4).Value
            End If
        Next j
Next i

cap = Worksheets("visual2").Cells(38, 2).Value
Total = 0
rtnum = 1
stopit = 0
i = 1
ID = 1
NodesUnsIn = 0

While Not stopit = 1

Total = Total + d(i)

If Total < cap Then
    free = cap - Total
    unserv(i) = 0
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 5).Value = free
```

```
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 6).Value = 0
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 7).Value = 0
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 8).Value = unserv(i)
    ind(i) = rtnum
    i = i + 1
End If

If Total = cap Then
    unserv(i) = 0
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 5).Value = 0
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 6).Value = 0
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 7).Value = 0
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 8).Value = unserv(i)
    ind(i) = rtnum
    rtnum = rtnum + 1
    Total = 0
    i = i + 1
    ID = i
End If

If Total > cap Then

    free = cap - (Total - d(i))
    unserv(i) = d(i) - free
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 5).Value = 0
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 6).Value = unserv(i)
    NodesUnsIn = NodesUnsIn + 1
    NodesUns(NodesUnsIn) = an(i)
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 7).Value =
NodesUns(NodesUnsIn)
    NodesUnsLine(NodesUnsIn) = i
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 8).Value = unserv(i)
    ind(i) = rtnum
    rtnum = rtnum + 1
    Total = 0
    i = i + 1
    ID = i
 End If

If i > 15 Then stopit = 1

Wend

For i = 1 To 15
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 3).Value = ind(i)
Next i

If NodesUnsIn <> 0 Then
    Total2 = 0
    rtnum = rtnum + 1
    extraroutes = 1
    i = 1
    While i <= NodesUnsIn
        Total2 = Total2 + unserv(NodesUnsLine(i))

        If Total2 < cap Then
            free2 = cap - Total2
            Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 9).Value = Total2
```

```
            Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 10).Value = free2
            Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 11).Value = 0
            Worksheets("visual2").Cells((NodesUnsLine(i)) + 1,
12).Value = rtnum
            ind2(i) = rtnum
            Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 13).Value =
ind2(i)
            i = i + 1

        ElseIf Total2 = cap Then
            free2 = 0
            Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 9).Value = Total2
            Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 10).Value = free2
            Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 11).Value = 0
            Worksheets("visual2").Cells((NodesUnsLine(i)) + 1,
12).Value = rtnum
            ind2(i) = rtnum
            Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 13).Value =
ind2(i)
            i = i + 1

        ElseIf Total2 > cap Then
            free2 = 0
            Total2 = 0
            rtnum = rtnum + 1
            extraroutes = extraroutes + 1
            Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 9).Value = Total2
            Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 10).Value = free2
            Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 11).Value =
unserv(NodesUnsLine(i))
            Worksheets("visual2").Cells((NodesUnsLine(i)) + 1,
12).Value = rtnum
            ind2(i) = rtnum
            Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 13).Value =
ind2(i)
            i = i + 1

        End If

Wend
End If
basicroutes = rtnum - extraroutes
For i = 1 To 15
    ReDim srpos(rtnum + 1), pen(rtnum)
    counter = 0
    ind(0) = 0
Next i

For i = 1 To 15
    If ind(i - 1) < ind(i) Then
        counter = counter + 1
        srpos(counter) = i
        basicroutes = counter
    End If
    Worksheets("visual2").Cells(i, 18).Value = srpos(counter)
Next i
srpos(basicroutes + 1) = 16
tot = 0
```

```
ReDim tot1(basicroutes + 1), srpos2(extraroutes + 1),
tot2(extraroutes + 1)
srpos2(extraroutes + 1) = NodesUnsIn + 1

For i = 1 To basicroutes
    a = srpos(i)
    b = srpos(i + 1) - 1
    dist = 0
    dist0a = tb(a)
    distb0 = Worksheets("times2").Cells(3 + b, 18).Value
    For j = a To (b - 1)
        dist = dist + Worksheets("times2").Cells(3 + an(j), 2 +
an(j + 1)).Value + st(j)
    Next j

    tot1(i) = dist + st(b) + dist0a + distb0

Next i
c2 = 0
ind2(0) = 0
For i = 1 To NodesUnsIn
    If ind2(i - 1) < ind2(i) Then
        c2 = c2 + 1
        srpos2(c2) = i
    End If
     Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 20).Value = srpos2(c2)
Next i

For i = 1 To extraroutes
    a = srpos2(i)
    b = srpos2(i + 1) - 1
    dist = 0
    dist0a = Worksheets("visual2").Cells(19 + NodesUns(a),
3).Value
    distb0 = Worksheets("times2").Cells(3 + NodesUns(b),
18).Value
    For j = a To (b - 1)
        dist = dist + Worksheets("times2").Cells(3 + NodesUns(j),
2 + NodesUns(j + 1)).Value
    Next j

    tot2(i) = dist + st(b) + dist0a + distb0

Next i
tota = 0
totb = 0

For k = 1 To basicroutes

    tota = tota + tot1(k)
Next k
For k = 1 To extraroutes

    totb = totb + tot2(k)
Next k
un = 0
For i = 1 To 15
```

```
    un = un + unserv(i)
Next i

Totalcost1 = tota + totb + un + rtnum
Worksheets("visual2").Cells(3, 2).Value = Totalcost1


For i = 2 To 16
    getnew = Worksheets("visual3").Cells(i, 1).Value
    For j = 20 To 34
        check = Worksheets("visual3").Cells(j, 1).Value

        If check = getnew Then
           an(i - 1) = Worksheets("visual3").Cells(j, 1).Value
           st(i - 1) = Worksheets("visual3").Cells(j, 2).Value
           tb(i - 1) = Worksheets("visual3").Cells(j, 3).Value
           d(i - 1) = Worksheets("demand").Cells(j - 16, 5).Value
            End If
        Next j
Next i

cap = Worksheets("visual3").Cells(38, 2).Value
Total = 0
rtnum = 1
stopit = 0
i = 1
ID = 1
NodesUnsIn = 0

While Not stopit = 1

Total = Total + d(i)

If Total < cap Then
    free = cap - Total
    unserv(i) = 0
    Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 5).Value = free
    Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 6).Value = 0
    Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 7).Value = 0
    Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 8).Value = unserv(i)
    ind(i) = rtnum
    i = i + 1
End If

If Total = cap Then
    unserv(i) = 0
    Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 5).Value = 0
    Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 6).Value = 0
    Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 7).Value = 0
    Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 8).Value = unserv(i)
    ind(i) = rtnum
    rtnum = rtnum + 1
    Total = 0
    i = i + 1
    ID = i
End If

If Total > cap Then
```

```
    free = cap - (Total - d(i))
    unserv(i) = d(i) - free
    Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 5).Value = 0
    Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 6).Value = unserv(i)
    NodesUnsIn = NodesUnsIn + 1
    NodesUns(NodesUnsIn) = an(i)
    Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 7).Value =
NodesUns(NodesUnsIn)
    NodesUnsLine(NodesUnsIn) = i
    Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 8).Value = unserv(i)
    ind(i) = rtnum
    rtnum = rtnum + 1
    Total = 0
    i = i + 1
    ID = i
 End If

If i > 15 Then stopit = 1

Wend

For i = 1 To 15
    Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 3).Value = ind(i)
Next i

If NodesUnsIn <> 0 Then
    Total2 = 0
    rtnum = rtnum + 1
    extraroutes = 1
    i = 1
    While i <= NodesUnsIn
        Total2 = Total2 + unserv(NodesUnsLine(i))

        If Total2 < cap Then
            free2 = cap - Total2
            Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 9).Value = Total2
            Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 10).Value = free2
            Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 11).Value = 0
            Worksheets("visual3").Cells((NodesUnsLine(i)) + 1,
12).Value = rtnum
            ind2(i) = rtnum
            Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 13).Value =
ind2(i)
            i = i + 1

        ElseIf Total2 = cap Then
            free2 = 0
            Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 9).Value = Total2
            Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 10).Value = free2
            Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 11).Value = 0
            Worksheets("visual3").Cells((NodesUnsLine(i)) + 1,
12).Value = rtnum
            ind2(i) = rtnum
            Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 13).Value =
ind2(i)
            i = i + 1
```

```
        ElseIf Total2 > cap Then
            free2 = 0
            Total2 = 0
            rtnum = rtnum + 1
            extraroutes = extraroutes + 1
            Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 9).Value = Total2
            Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 10).Value = free2
            Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 11).Value =
unserv(NodesUnsLine(i))
            Worksheets("visual3").Cells((NodesUnsLine(i)) + 1,
12).Value = rtnum
            ind2(i) = rtnum
            Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 13).Value =
ind2(i)
            i = i + 1

        End If

Wend
End If
basicroutes = rtnum - extraroutes
For i = 1 To 15
    ReDim srpos(rtnum + 1), pen(rtnum)
    counter = 0
    ind(0) = 0
Next i

For i = 1 To 15
    If ind(i - 1) < ind(i) Then
        counter = counter + 1
        srpos(counter) = i
        basicroutes = counter
    End If
    Worksheets("visual3").Cells(i, 18).Value = srpos(counter)
Next i
srpos(basicroutes + 1) = 16
tot = 0

ReDim tot1(basicroutes + 1), srpos2(extraroutes + 1),
tot2(extraroutes + 1)
srpos2(extraroutes + 1) = NodesUnsIn + 1

For i = 1 To basicroutes
    a = srpos(i)
    b = srpos(i + 1) - 1
    dist = 0
    dist0a = tb(a)
    distb0 = Worksheets("times3").Cells(3 + b, 18).Value
    For j = a To (b - 1)
        dist = dist + Worksheets("times3").Cells(3 + an(j), 2 +
an(j + 1)).Value + st(j)
    Next j

    tot1(i) = dist + st(b) + dist0a + distb0

Next i
c2 = 0
ind2(0) = 0
```

```
For i = 1 To NodesUnsIn
    If ind2(i - 1) < ind2(i) Then
        c2 = c2 + 1
        srpos2(c2) = i
    End If
     Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 20).Value = srpos2(c2)
Next i

For i = 1 To extraroutes
    a = srpos2(i)
    b = srpos2(i + 1) - 1
    dist = 0
    dist0a = Worksheets("visual3").Cells(19 + NodesUns(a),
3).Value
    distb0 = Worksheets("times3").Cells(3 + NodesUns(b),
18).Value
    For j = a To (b - 1)
        dist = dist + Worksheets("times3").Cells(3 + NodesUns(j),
2 + NodesUns(j + 1)).Value
    Next j

    tot2(i) = dist + st(b) + dist0a + distb0

Next i
tota = 0
totb = 0

For k = 1 To basicroutes

    tota = tota + tot1(k)
Next k
For k = 1 To extraroutes

    totb = totb + tot2(k)
Next k
un = 0
For i = 1 To 15
    un = un + unserv(i)
Next i

Totalcost1 = tota + totb + un + rtnum
Worksheets("visual3").Cells(3, 2).Value = Totalcost1

End Sub

Function totalcost(Value1) As Single

Dim c(15) As Integer
Dim servt(15) As Single, d(15) As Single, pen() As Double,
unserv(15) As Integer, NodesUnsLine(15) As Integer, ind2(15) As
Integer
Dim ss(15) As Single, NodesUns(15) As Integer, st(15) As Single,
UnsDemNod(15) As Integer
Dim an(15), ind(15) As Integer, tb(15) As Single, srpos(),
srpos2(), tot1(), tot2() As Single

For i = 2 To 16
    getnew = Worksheets("visual").Cells(i, 1).Value
```

```
     For j = 20 To 34
        check = Worksheets("visual").Cells(j, 1).Value

        If check = getnew Then
           an(i - 1) = Worksheets("visual").Cells(j, 1).Value
           st(i - 1) = Worksheets("visual").Cells(j, 2).Value
           tb(i - 1) = Worksheets("visual").Cells(j, 3).Value
           d(i - 1) = Worksheets("demand").Cells(j - 16, 3).Value
            End If
        Next j
    Next i

    cap = Worksheets("visual").Cells(38, 2).Value
Total = 0
rtnum = 1
stopit = 0
i = 1
ID = 1
NodesUnsIn = 0

While Not stopit = 1

Total = Total + d(i)

If Total < cap Then
    free = cap - Total
    unserv(i) = 0
   ind(i) = rtnum
    i = i + 1
End If

If Total = cap Then
    unserv(i) = 0

    ind(i) = rtnum
    rtnum = rtnum + 1
    Total = 0
    i = i + 1
    ID = i
End If

If Total > cap Then

    free = cap - (Total - d(i))
    unserv(i) = d(i) - free

    NodesUnsIn = NodesUnsIn + 1
    NodesUns(NodesUnsIn) = an(i)

    NodesUnsLine(NodesUnsIn) = i

    ind(i) = rtnum
    rtnum = rtnum + 1
    Total = 0
    i = i + 1
    ID = i
 End If
```

```
If i > 15 Then stopit = 1

Wend

If NodesUnsIn <> 0 Then
    Total2 = 0
    rtnum = rtnum + 1
    extraroutes = 1
    i = 1
    While i <= NodesUnsIn
        Total2 = Total2 + unserv(NodesUnsLine(i))

        If Total2 < cap Then
            free2 = cap - Total2

            ind2(i) = rtnum

            i = i + 1

        ElseIf Total2 = cap Then
            free2 = 0

            ind2(i) = rtnum

            i = i + 1

        ElseIf Total2 > cap Then
            free2 = 0
            Total2 = 0
            rtnum = rtnum + 1
            extraroutes = extraroutes + 1

            ind2(i) = rtnum

            i = i + 1

        End If

Wend
End If

basicroutes = rtnum - extraroutes

    ReDim srpos(rtnum + 1), pen(rtnum)
    counter = 0
    ind(0) = 0


For i = 1 To 15
    If ind(i - 1) < ind(i) Then
        counter = counter + 1
        srpos(counter) = i
        basicroutes = counter
    End If

Next i
```

```
srpos(basicroutes + 1) = 16
tot = 0

ReDim tot1(basicroutes + 1), srpos2(extraroutes + 1),
tot2(extraroutes + 1)
srpos2(extraroutes + 1) = NodesUnsIn + 1

For i = 1 To basicroutes
    a = srpos(i)
    b = srpos(i + 1) - 1
    dist = 0
    dist0a = tb(a)
    distb0 = Worksheets("times").Cells(3 + b, 18).Value
    For j = a To (b - 1)
        dist = dist + Worksheets("times").Cells(3 + an(j), 2 +
an(j + 1)).Value + st(j)
    Next j

    tot1(i) = dist + st(b) + dist0a + distb0
Next i

c2 = 0
ind2(0) = 0
For i = 1 To NodesUnsIn
    If ind2(i - 1) < ind2(i) Then
        c2 = c2 + 1
        srpos2(c2) = i
    End If

Next i

For i = 1 To extraroutes
    a = srpos2(i)
    b = srpos2(i + 1) - 1
    dist = 0
    dist0a = Worksheets("visual").Cells(19 + NodesUns(a),
3).Value
    distb0 = Worksheets("times").Cells(3 + NodesUns(b), 18).Value
    For j = a To (b - 1)
        dist = dist + Worksheets("times").Cells(3 + NodesUns(j),
2 + NodesUns(j + 1)).Value
    Next j

    tot2(i) = dist + st(b) + dist0a + distb0

Next i
tota = 0
totb = 0
For k = 1 To basicroutes

    tota = tota + tot1(k)
Next k
For k = 1 To extraroutes

    totb = totb + tot2(k)
Next k
un = 0
For i = 1 To 15
```

```
    un = un + unserv(i)
Next i

tc = tota + totb + un + rtnum

totalcost = tc

End Function

Function totalcost2(Value1) As Single

Dim c(15) As Integer
Dim servt(15) As Single, d(15) As Single, pen() As Double,
unserv(15) As Integer, NodesUnsLine(15) As Integer, ind2(15) As
Integer
Dim ss(15) As Single, NodesUns(15) As Integer, st(15) As Single,
UnsDemNod(15) As Integer
Dim an(15), ind(15) As Integer, tb(15) As Single, srpos(),
srpos2(), tot1(), tot2() As Single

For i = 2 To 16
    getnew = Worksheets("visual2").Cells(i, 1).Value
    For j = 20 To 34
        check = Worksheets("visual2").Cells(j, 1).Value

        If check = getnew Then
           an(i - 1) = Worksheets("visual2").Cells(j, 1).Value
           st(i - 1) = Worksheets("visual2").Cells(j, 2).Value
           tb(i - 1) = Worksheets("visual2").Cells(j, 3).Value
           d(i - 1) = Worksheets("demand").Cells(j - 16, 4).Value
            End If
        Next j
    Next i

    cap = Worksheets("visual2").Cells(38, 2).Value
Total = 0
rtnum = 1
stopit = 0
i = 1
ID = 1
NodesUnsIn = 0

While Not stopit = 1

Total = Total + d(i)

If Total < cap Then
    free = cap - Total
    unserv(i) = 0
   ind(i) = rtnum
    i = i + 1
End If

If Total = cap Then
    unserv(i) = 0

    ind(i) = rtnum
    rtnum = rtnum + 1
```

```
    Total = 0
    i = i + 1
    ID = i
End If

If Total > cap Then

    free = cap - (Total - d(i))
    unserv(i) = d(i) - free

    NodesUnsIn = NodesUnsIn + 1
    NodesUns(NodesUnsIn) = an(i)

    NodesUnsLine(NodesUnsIn) = i

    ind(i) = rtnum
    rtnum = rtnum + 1
    Total = 0
    i = i + 1
    ID = i
 End If

If i > 15 Then stopit = 1

Wend

If NodesUnsIn <> 0 Then
    Total2 = 0
    rtnum = rtnum + 1
    extraroutes = 1
    i = 1
    While i <= NodesUnsIn
        Total2 = Total2 + unserv(NodesUnsLine(i))

        If Total2 < cap Then
            free2 = cap - Total2

            ind2(i) = rtnum

            i = i + 1

        ElseIf Total2 = cap Then
            free2 = 0

            ind2(i) = rtnum

            i = i + 1

        ElseIf Total2 > cap Then
            free2 = 0
            Total2 = 0
            rtnum = rtnum + 1
            extraroutes = extraroutes + 1

            ind2(i) = rtnum

            i = i + 1
```

```
        End If

Wend
End If

basicroutes = rtnum - extraroutes

    ReDim srpos(rtnum + 1), pen(rtnum)
    counter = 0
    ind(0) = 0

For i = 1 To 15
    If ind(i - 1) < ind(i) Then
        counter = counter + 1
        srpos(counter) = i
        basicroutes = counter
    End If

Next i

srpos(basicroutes + 1) = 16
tot = 0

ReDim tot1(basicroutes + 1), srpos2(extraroutes + 1),
tot2(extraroutes + 1)
srpos2(extraroutes + 1) = NodesUnsIn + 1

For i = 1 To basicroutes
    a = srpos(i)
    b = srpos(i + 1) - 1
    dist = 0
    dist0a = tb(a)
    distb0 = Worksheets("times2").Cells(3 + b, 18).Value
    For j = a To (b - 1)
        dist = dist + Worksheets("times2").Cells(3 + an(j), 2 +
an(j + 1)).Value + st(j)
    Next j

    tot1(i) = dist + st(b) + dist0a + distb0
Next i

c2 = 0
ind2(0) = 0
For i = 1 To NodesUnsIn
    If ind2(i - 1) < ind2(i) Then
        c2 = c2 + 1
        srpos2(c2) = i
    End If

Next i

For i = 1 To extraroutes
    a = srpos2(i)
    b = srpos2(i + 1) - 1
    dist = 0
    dist0a = Worksheets("visual2").Cells(19 + NodesUns(a),
3).Value
```

```
    distb0 = Worksheets("times2").Cells(3 + NodesUns(b),
18).Value
    For j = a To (b - 1)
        dist = dist + Worksheets("times2").Cells(3 + NodesUns(j),
2 + NodesUns(j + 1)).Value
    Next j

    tot2(i) = dist + st(b) + dist0a + distb0

Next i
tota = 0
totb = 0
For k = 1 To basicroutes

    tota = tota + tot1(k)
Next k
For k = 1 To extraroutes

    totb = totb + tot2(k)
Next k
un = 0
For i = 1 To 15
    un = un + unserv(i)
Next i

tc = tota + totb + un + rtnum

totalcost2 = tc

End Function

Function totalcost3(Value1) As Single

Dim c(15) As Integer
Dim servt(15) As Single, d(15) As Single, pen() As Double,
unserv(15) As Integer, NodesUnsLine(15) As Integer, ind2(15) As
Integer
Dim ss(15) As Single, NodesUns(15) As Integer, st(15) As Single,
UnsDemNod(15) As Integer
Dim an(15), ind(15) As Integer, tb(15) As Single, srpos(),
srpos2(), tot1(), tot2() As Single

For i = 2 To 16
    getnew = Worksheets("visual3").Cells(i, 1).Value
    For j = 20 To 34
        check = Worksheets("visual3").Cells(j, 1).Value

        If check = getnew Then
           an(i - 1) = Worksheets("visual3").Cells(j, 1).Value
           st(i - 1) = Worksheets("visual3").Cells(j, 2).Value
           tb(i - 1) = Worksheets("visual3").Cells(j, 3).Value
           d(i - 1) = Worksheets("demand").Cells(j - 16, 5).Value
            End If
        Next j
    Next i
```

```
cap = Worksheets("visual3").Cells(38, 2).Value
Total = 0
rtnum = 1
stopit = 0
i = 1
ID = 1
NodesUnsIn = 0

While Not stopit = 1

Total = Total + d(i)

If Total < cap Then
    free = cap - Total
    unserv(i) = 0
   ind(i) = rtnum
    i = i + 1
End If

If Total = cap Then
    unserv(i) = 0

    ind(i) = rtnum
    rtnum = rtnum + 1
    Total = 0
    i = i + 1
    ID = i
End If

If Total > cap Then

    free = cap - (Total - d(i))
    unserv(i) = d(i) - free

    NodesUnsIn = NodesUnsIn + 1
    NodesUns(NodesUnsIn) = an(i)

    NodesUnsLine(NodesUnsIn) = i

    ind(i) = rtnum
    rtnum = rtnum + 1
    Total = 0
    i = i + 1
    ID = i
 End If

If i > 15 Then stopit = 1

Wend

If NodesUnsIn <> 0 Then
    Total2 = 0
    rtnum = rtnum + 1
    extraroutes = 1
    i = 1
    While i <= NodesUnsIn
        Total2 = Total2 + unserv(NodesUnsLine(i))
```

```
        If Total2 < cap Then
            free2 = cap - Total2

            ind2(i) = rtnum

            i = i + 1

        ElseIf Total2 = cap Then
            free2 = 0

            ind2(i) = rtnum

            i = i + 1

        ElseIf Total2 > cap Then
            free2 = 0
            Total2 = 0
            rtnum = rtnum + 1
            extraroutes = extraroutes + 1

            ind2(i) = rtnum

            i = i + 1

        End If

Wend
End If

basicroutes = rtnum - extraroutes

    ReDim srpos(rtnum + 1), pen(rtnum)
    counter = 0
    ind(0) = 0

For i = 1 To 15
    If ind(i - 1) < ind(i) Then
        counter = counter + 1
        srpos(counter) = i
        basicroutes = counter
    End If

Next i

srpos(basicroutes + 1) = 16
tot = 0

ReDim tot1(basicroutes + 1), srpos2(extraroutes + 1),
tot2(extraroutes + 1)
srpos2(extraroutes + 1) = NodesUnsIn + 1

For i = 1 To basicroutes
    a = srpos(i)
    b = srpos(i + 1) - 1
    dist = 0
    dist0a = tb(a)
    distb0 = Worksheets("times3").Cells(3 + b, 18).Value
    For j = a To (b - 1)
```

```
        dist = dist + Worksheets("times3").Cells(3 + an(j), 2 +
an(j + 1)).Value + st(j)
    Next j

    tot1(i) = dist + st(b) + dist0a + distb0
Next i

c2 = 0
ind2(0) = 0
For i = 1 To NodesUnsIn
    If ind2(i - 1) < ind2(i) Then
        c2 = c2 + 1
        srpos2(c2) = i
    End If

Next i

For i = 1 To extraroutes
    a = srpos2(i)
    b = srpos2(i + 1) - 1
    dist = 0
    dist0a = Worksheets("visual3").Cells(19 + NodesUns(a),
3).Value
    distb0 = Worksheets("times3").Cells(3 + NodesUns(b),
18).Value
    For j = a To (b - 1)
        dist = dist + Worksheets("times3").Cells(3 + NodesUns(j),
2 + NodesUns(j + 1)).Value
    Next j

    tot2(i) = dist + st(b) + dist0a + distb0

Next i
tota = 0
totb = 0
For k = 1 To basicroutes

    tota = tota + tot1(k)
Next k
For k = 1 To extraroutes

    totb = totb + tot2(k)
Next k
un = 0
For i = 1 To 15
    un = un + unserv(i)
Next i

tc = tota + totb + un + rtnum

totalcost3 = tc

End Function
```