ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία:

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΣΤΙΚΩΝ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΜΕ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ

Νιώρας Δημήτριος

Επιβλέπων:

Κεπαπτσόγλου Κωνσταντίνος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2016

Το περιεχόμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί προϊόν προσωπικής πνευματικής προσπάθειας. Η οποιαδήποτε αναπαραγωγή του συνόλου ή τμήματος αυτής θα πρέπει να συνοδεύεται από ξεκάθαρη αναφορά του δημιουργού.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κ. Κωνσταντίνο Κεπαπτσόγλου, τόσο για τη σημαντική προσφορά του στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας, όσο και για την ουσιαστική συμβολή του στην προσπάθεια εκπλήρωσης των στόχων μου εντός και εκτός ακαδημαϊκού περιβάλλοντος.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Υποψήφια Διδάκτορα της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ Χριστίνα Ηλιοπούλου για την πολύτιμη καθοδήγηση που μου παρείχε καθ’ όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για τη συμπαράστασή και την υπομονή τους σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Ο επιστήμων άνθρωπος δεν στοχεύει σε
άμεσο αποτέλεσμα· καθήκον του είναι να
θέσει τα θεμέλια για αυτούς που έρχονται,
και να δείξει τον δρόμο...

Nikola Tesla (1856-1943)

Περίληψη

Τίτλος: *“Ανάπτυξη μοντέλου βέλτιστου σχεδιασμού δικτύου αστικών συγκοινωνιών με κοινωνικοοικονομικά κριτήρια”*

Επιβλέπων καθηγητής: Κεπαπτσόγλου Κωνσταντίνος

Αθήνα, Ιούλιος 2016

Η παρούσα εργασία αποτελεί την αφετηρία μίας νέας λογικής σχεδιασμού δικτύων αστικών συγκοινωνιών η οποία, σε αντίθεση με τις υπάρχουσες δημοσιευμένες εργασίες, λαμβάνει υπόψη όλες τις κατηγορίες μετακινούμενων, δίνει προτεραιότητα στην εξυπηρέτηση των δέσμιων χρηστών, των χρηστών δηλαδή που δεν έχουν εναλλακτική μετακίνησης εκτός από την αστική συγκοινωνία. Προωθεί, έτσι, τη βιώσιμη κινητικότητα παρέχοντας δυνατότητα εξυπηρέτησης σε όσο το δυνατόν περισσότερους δυνητικούς αλλά όχι υφιστάμενους χρήστες των αστικών συγκοινωνιών. Με δεδομένα εισόδου το οδικό δίκτυο, τους πίνακες Προέλευσης – Προορισμού για το σύνολο και για τους δέσμιους χρήστες, καθώς και τις δυνατότητες των φορέων παροχής συγκοινωνιακού έργου πραγματοποιείται σχεδιασμός και βελτιστοποίηση δικτύου αστικών συγκοινωνιών με στόχο την εξυπηρέτηση του συνόλου των δέσμιων χρηστών και όσο το δυνατόν περισσότερων μη δέσμιων, έχοντας ως όριο τις δυνατότητες των φορέων. Η διαδικασία σχεδιασμού πραγματοποιείται σε τρεις φάσεις. Η πρώτη φάση περιλαμβάνει τον αρχικό σχεδιασμό του δικτύου με δεδομένα εισόδου τον πίνακα προέλευσης – προορισμού των δέσμιων χρηστών, έτσι ώστε να δημιουργηθεί μία βάση με προοπτικές ικανοποιητικής εξυπηρέτησης των δέσμιων χρηστών. Η δεύτερη φάση περιλαμβάνει την βελτιστοποίηση του δικτύου που προέκυψε από την πρώτη φάση για το σύνολο των χρηστών έχοντας ως στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους του φορέα και των επιβατών. Η τρίτη και τελευταία φάση περιλαμβάνει τον έλεγχο των αποτελεσμάτων της δεύτερης φάσης και τον υπολογισμό των εξαγόμενων στοιχείων, τα οποία είναι οι διαδρομές, οι συχνότητες, το ποσοστό εξυπηρέτησης των δέσμιων χρηστών και το μέγιστο ποσοστό εξυπηρέτησης των δυνητικά εισερχόμενων επιβατών στο σύστημα. Τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η δυνατότητα ένταξης νέων χρηστών στο σύστημα αστικών συγκοινωνιών, η εξασφάλιση του ελάχιστου κοινωνικού δικαιώματος στη μετακίνηση για τους δέσμιους χρήστες, καθώς και η προσαρμογή του σχεδιασμού στις δυνατότητες των φορέων παροχής συγκοινωνιακού έργου.

Λέξεις-κλειδιά: σχεδιασμός δικτύου αστικών συγκοινωνιών, βελτιστοποίηση δικτύων, γενετικός αλγόριθμος, δέσμιοι χρήστες, βιώσιμη κινητικότητα, κοινωνικοοικονομικά κριτήρια

Abstract

Title: *"Optimal Urban Transit Network Design Model Development using socioeconomic criteria"*

Student's name: Nioras Dimitrios

Supervisor: Kepaptsoglou Konstantinos

Athens, July 2016

This thesis focuses on a new way of thinking when designing urban transportation networks which, unlike previous ones, takes into account all categories of travelers, namely the captive users, which do not have any travel alternatives apart from urban transportation, and then promotes sustainable mobility by providing service possibility to as many users as possible, in order to attract more choice riders. With the road network, the Origin-Destination matrices for total and captive users as input data, an urban transit network design and optimization process is done with the purpose of servicing the sum of captive users and also as many non captive (choice riders) users as possible, under operational constraints. The design procedure occurs in three phases. The first phase includes the initial network design, based on the origin – destination matrix of the captive users, so that a profitable network that fulfils the captive users' needs can be created. The second phase includes the first phase network's optimization for all users, aiming to minimize the operator and passenger costs. The third and final phase includes the evaluation of the results, which are the routes, the frequencies, the percent of captive users' satisfied and the maximum percent of the possible new users inserted in the network. The advantages of this method are the possibility of new users' integration to the urban transit system, the ensurance of the minimum social right to transportation for the captive users and also the adaptation of the design to the transit operators' potential.

Keywords: urban transit network design, network optimization, genetic algorithm, captive users, sustainable mobility, socioeconomic criteria

Εκτεταμένη Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μία νέα προσέγγιση για την επίλυση του Προβλήματος Σχεδιασμού Δικτύου Αστικών Συγκοινωνιών (Transit Route Network Design Problem, TRNDP). Πιο συγκεκριμένα, έχοντας ως δεδομένα το δίκτυο της περιοχής μελέτης, τον πίνακα προέλευσης – προορισμού των συνολικών μετακινήσεων στο δίκτυο και τον πίνακα προέλευσης – προορισμού των μετακινήσεων των δέσμιων χρηστών πραγματοποιείται σχεδιασμός ενός αρχικού δικτύου, το οποίο στη συνέχεια βελτιστοποιείται με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου. Η διαφορά αυτής της προσέγγισης από τις υφιστάμενες έγκειται στο γεγονός ότι, αντί να χρησιμοποιείται στα δεδομένα ο πίνακας προέλευσης – προορισμού του συνόλου των μετακινούμενων που χρησιμοποιούν τα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς, τα δεδομένα μετακινήσεων χωρίζονται στον πίνακα προέλευσης – προορισμού των συνολικών μετακινήσεων στην περιοχή, ανεξαρτήτως επιλογής μέσου, και τον πίνακα προέλευσης – προορισμού των μετακινήσεων των δέσμιων χρηστών.

Τα δεδομένα του προβλήματος αποτελούνται από το δίκτυο και τους πίνακες προέλευσης – προορισμού. Το δίκτυο αναλύεται σε κόμβους και συνδέσμους. Οι κόμβοι αποτελούν τις υποψήφιες στάσεις των γραμμών του δικτύου, ενώ οι σύνδεσμοι ενώνουν τους γειτονικούς κόμβους μεταξύ τους και ορίζουν τους χρόνους διαδρομής, οι οποίοι στο συγκεκριμένο πρόβλημα θεωρούνται σταθεροί. Οι πίνακες προέλευσης – προορισμού αποδίδουν τιμές επιβατικής κίνησης μεταξύ των κόμβων του δικτύου, έτσι ώστε να ορίσουν τις μετακινήσεις που πραγματοποιούνται στο δίκτυο και πρέπει να εξυπηρετηθούν.

Το συγκεκριμένο πρόβλημα παρουσιάζεται ως μία αρκετά περίπλοκη μορφή ακέραιου προγραμματισμού, στο οποίο υπάρχει μία αντικειμενική συνάρτηση η οποία, υπό συγκεκριμένους περιορισμούς, πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Η συνάρτηση ορίζεται ως το άθροισμα του κόστους των επιβατών, δηλαδή οι όροι της συνάρτησης είναι ο συνολικός χρόνος μετακίνησης των επιβατών και το άθροισμα των ποινών μετεπιβίβασης. Οι περιορισμοί που τέθηκαν ήταν οι εξής:

α) Μήκος γραμμών: Οι γραμμές του παραγόμενου δικτύου πρέπει να βρίσκονται εντός συγκεκριμένων ορίων, τα οποία ορίζονται από τον αριθμό στάσεων που εξυπηρετεί η γραμμή.

β) Ομοιότητα γραμμών: Στο παραγόμενο δίκτυο δεν πρέπει να υπάρχουν γραμμές με ίδια αλληλουχία στάσεων, διότι το δίκτυο θεωρείται ελλιπές ως προς τον αριθμό των γραμμών, εφόσον οι όμοιες προσμετρούνται ως μία και όχι δύο.

γ) Ικανοποίηση επιβατών: Το παραγόμενο δίκτυο δεν πρέπει να αφήνει επιβάτες που να μην εξυπηρετούνται, δηλαδή να αφήνει κάποιον κόμβο που παράγει ή ελκύει μετακινήσεις χωρίς να διέρχεται από αυτόν τουλάχιστον μία γραμμή.

δ) Χαρακτηριστικά οχημάτων: Τα οχήματα που χρησιμοποιήθηκαν στην επίλυση είναι δύο τύπων: τυπικά 80 θέσεων και αρθρωτά 150 θέσεων.

ε) Συχνότητες: Με βάση τον τύπο οχήματος, οι συχνότητες διέλευσης βρίσκονται εντός συγκεκριμένων ορίων, βάσει της εφικτότητας εφαρμογής στην πραγματικότητα.

Η επίλυση πραγματοποιήθηκε με τη δημιουργία προγράμματος, το οποίο συντάχθηκε με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Python 3. Το προγραμματιστικό περιβάλλον που επιλέχθηκε για τη σύνταξη του κώδικα ήταν το PyCharm 2016.1 Community Edition. Το πρόγραμμα λειτουργεί ως εξής:

α) Εισαγωγή των δεδομένων δικτύου και μετακινήσεων

β) Δημιουργία αρχικού δικτύου με βάση τις μετακινήσεις των δέσμιων χρηστών

γ) Αξιολόγηση του αρχικού δικτύου με τη μέθοδο της ανάθεσης (assignment)

δ) Βελτίωση του αρχικού δικτύου με βάση τις συνολικές μετακινήσεις, με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου (Genetic Algorithm)

ε) Αξιολόγηση του τελικού δικτύου με τη μέθοδο της ανάθεσης (assignment)

στ) Υπολογισμός συχνοτήτων και απαιτήσεων σε οχήματα ανά γραμμή

ζ) Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Η προτεινόμενη μέθοδος επίλυσης του προβλήματος πετυχαίνει τρεις στόχους. Αρχικά, δε λαμβάνει υπόψιν μόνο τους χρήστες των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς, αλλά το σύνολο των μετακινούμενων στο δίκτυο. Επίσης, δίνει προτεραιότητα καταρχήν στους δέσμιους χρήστες, αναδεικνύοντας τον κοινωνικό χαρακτήρα των αστικών συγκοινωνιών με την εξασφάλιση του βασικού δικαιώματος στη μετακίνηση. Τέλος, προωθεί ουσιαστικά τη βιώσιμη κινητικότητα με κριτήρια ισότητας, παρέχοντας επιλογή μετακίνησης στους μη δέσμιους χρήστες ανταγωνιστική του αυτοκινήτου. Ο σχεδιασμός δημιουργείται με βάση τους δέσμιους χρήστες, έτσι ώστε να επιτευχθεί ο δεύτερος στόχος, και βελτιστοποιείται με βάση το σύνολο των χρηστών, έτσι ώστε να επιτευχθεί ο τρίτος στόχος. Το τελικό δίκτυο αποτελεί έναν συνδυασμό κοινωνικού σχεδιασμού με ταυτόχρονη αύξηση της ελκυστικότητας της χρήσης Μέσων Μαζικής Μεταφοράς για τους χρήστες ιδιωτικών αυτοκινήτων.

Τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου βρίσκονται πολύ κοντά με τα αντίστοιχα της βιβλιογραφίας, μειωμένα ελαφρά λόγω της διαφορετικής προσέγγισης. Παρόλο όμως που

δεν είναι καλύτερα από τα αντίστοιχα της βιβλιογραφίας, είναι σίγουρο ότι σε μία εφαρμογή σε πραγματικό δίκτυο, στο οποίο υπάρχει γνώση των δέσμιων χρηστών, τα κοινωνικά ωφέλη θα είναι περισσότερα και θα αντισταθμίζουν τη μικρή διαφορά των αποτελεσμάτων.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή 1
1.1. Το πρόβλημα σχεδιασμού των μεταφορών 1
1.2. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας 2
1.3. Δομή της διπλωματικής εργασίας 3

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση 5
2.1. Σχεδιασμός γραμμών συγκοινωνιακού δικτύου 7
2.1.1.α. Συμβατικές αναλυτικές μέθοδοι 7
2.1.1.β. Συμβατικές μέθοδοι μαθηματικού προγραμματισμού 7
2.1.2. Ευρετικές – Μεθευρετικές μέθοδοι 8
2.1.3. Συνδυασμός συμβατικών και ευρετικών μεθόδων 12
2.2. Καθορισμός συχνοτήτων γραμμών 13
2.2.1. Συμβατικές μέθοδοι 13
2.2.2. Ευρετικές – Μεθευρετικές μέθοδοι 13
2.3. Ταυτόχρονος σχεδιασμός γραμμών και καθορισμός συχνοτήτων 14
2.3.1. Συμβατικές μέθοδοι 14
2.3.2. Ευρετικές – Μεθευρετικές μέθοδοι 14
2.4. Καθορισμός δρομολογίων 18
2.5. Συνοπτικοί πίνακες 18

3. Δεδομένα του προβλήματος 21
3.1. Ανάλυση περιοχής μελέτης – Οδικό δίκτυο 21
3.2. Μετακινήσεις – Ζήτηση 22
3.2.1. Σύνολο μετακινούμενων 23
3.2.2. Δέσμιοι χρήστες 24
3.3. Παραδοχές 26

4. Διαμόρφωση μαθηματικού προτύπου επίλυσης 27
4.1. Γενικά 27
4.2. Διατύπωση του προβλήματος 28
4.2.1. Αντικειμενική συνάρτηση 28
4.2.2. Περιορισμοί 28
4.3. Ανάλυση αντικειμενικής συνάρτησης 29
4.4. Ανάλυση περιορισμών 30
4.5. Μορφή αντικειμενικής συνάρτησης 31
4.6. Κατηγοριοποίηση περιορισμών 31
4.7. Εφαρμοζόμενες ποινές 32

5. Μεθοδολογία επίλυσης 35
5.1. Περιβάλλον επίλυσης.....35
5.2. Τεχνικές επίλυσης 36
5.2.1. Γενικά 36
5.2.2. Ιστορική αναδρομή γενετικών αλγορίθμων.....37
5.2.3. Διαδικασία εκτέλεσης γενετικού αλγορίθμου.....39
5.2.4. Πλεονεκτήματα χρήσης γενετικού αλγορίθμου 44
5.3. Παρουσίαση της δομής του προγράμματος επίλυσης 45
5.3.1. Γενικά 45
5.3.2. Αναλυτική παρουσίαση των βημάτων επίλυσης 47

6. Εφαρμογή – Αποτελέσματα 53
6.1. Επίλυση δικτύου 6 γραμμών 53
6.1.1. Επιλογή παραμέτρων.....53
6.1.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων 54
6.1.3. Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων.....59
6.2. Επίλυση δικτύου 7 γραμμών 60
6.2.1. Επιλογή παραμέτρων.....60
6.2.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων 60
6.2.3. Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων.....65
6.3. Επίλυση δικτύου 8 γραμμών 67
6.3.1. Επιλογή παραμέτρων.....67
6.3.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων 67
6.3.3. Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων.....72
6.4. Ανάλυση αποτελεσμάτων.....74
6.4.1. Ανάλυση αποτελεσμάτων επίλυσης.....74
6.4.2. Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας 75

7. Επίλογος 77
7.1. Ανασκόπηση του προβλήματος 77
7.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα 77
7.2.1. Προτάσεις σχετικά με τη λογική επίλυσης του προβλήματος 78
7.2.2. Προτάσεις σχετικά με το τεχνικό τμήμα του προβλήματος 79

8. Βιβλιογραφία 81

Παράρτημα.....85

1. Εισαγωγή

1.1. Το πρόβλημα σχεδιασμού των μεταφορών

Οι μαζικές μεταφορές υφίστανται από την εποχή που πρωτοεμφανίστηκε η ανάγκη μετακίνησης με άλλους τρόπους πέραν του βαδίσματος. Από την αρχαιότητα υπήρχε η ανάγκη μεταφοράς ανθρώπων και αγαθών με τον οικονομικότερο δυνατό τρόπο. Με την ομαδοποίηση μεγάλου αριθμού παρόμοιων μετακινήσεων από ειδικά οχήματα μεταφοράς επιτυγχάνεται μείωση του κόστους μετακίνησης ανά επιβάτη και μείωση του αποτυπώματος στο δίκτυο.

Με την επινόηση και υιοθέτηση του σιδηρόδρομου ο σχεδιασμός των δικτύων μαζικών μεταφορών αποκτά νόημα, καθώς η υλοποίηση του δικτύου απαιτεί προσεκτική μελέτη της χάραξης με βάση τις μεταφορικές ανάγκες. Ο σχεδιασμός πρέπει να ανταποκρίνεται όσο το δυνατόν περισσότερο στη ζήτηση για μετακίνηση, προκειμένου να αξιοποιηθούν τα ωφέλη των μαζικών μεταφορών.

Το πρόβλημα σχεδιασμού των μεταφορών περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες σχεδιασμού του δικτύου, δηλαδή τον προσδιορισμό των μετακινήσεων, τον σχεδιασμό του δικτύου, τον καθορισμό των συχνοτήτων αλλά και τον σχεδιασμό των βαρδιών του προσωπικού που παρέχει το συγκοινωνιακό έργο. Το πρόβλημα αυτό γίνεται πιο περίπλοκο όταν συνυπολογισθούν η δυναμικότητα των μετακινήσεων στο χρόνο σε επίπεδο ετών (μεταβολή των σκοπών μετακίνησης, μεταβολή των θέσεων εργασίας και των υπηρεσιών), σε επίπεδο εβδομάδας (διαφορετικές ανάγκες μετακίνησης για κάθε μέρα της εβδομάδας) και σε επίπεδο ημέρας (διαφορετικές ανάγκες μετακίνησης ανάλογα με την ώρα της ημέρας, ώρες αιχμής), καθώς και η ύπαρξη συγκεκριμένων ωραρίων εργασίας για το προσωπικό, η οποία έρχεται σε αντίθεση με τις ημερήσιες ώρες αιχμής, δημιουργώντας ανισότητες και μειώνοντας την αποδοτικότητα του προσωπικού.

Το πρόβλημα του σχεδιασμού των μεταφορών απασχολεί τόσο συγκοινωνιολόγους, όσο και μαθηματικούς και προγραμματιστές. Ειδικά η συμμετοχή των τελευταίων έχει ωφελήσει σε πολύ μεγάλο βαθμό τη βελτίωση των λύσεων του προβλήματος με τη χρήση αλγορίθμων σε προγραμματιστικό περιβάλλον. Κάθε βελτιωμένη λύση περιλαμβάνει διάφορες τεχνικές και εστίαση σε συγκεκριμένα ζητήματα του σχεδιασμού, όπως για παράδειγμα η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των μετακινούμενων στο δίκτυο, ο τρόπος επιλογής του αρχικού δικτύου και διάφορες μέθοδοι βελτιστοποίησής του. Με την πάροδο του χρόνου παρουσιάζονται συνεχώς νέες βελτιωμένες διαδικασίες, κάτι που δικαιολογεί τη συνεχή ενασχόληση των ενδιαφερόμενων ερευνητών με το συγκεκριμένο πρόβλημα. Μια ιδιαίτερη εναλλακτική λύση, η οποία θα αξιοποιηθεί παρακάτω, αναιρεί την μέχρι τώρα λογική σχεδιασμού με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους μετακίνησης

(άμεσου και έμμεσου) και παρουσιάζει μια λογική σχεδιασμού με σκοπό την μεγιστοποίηση της εξυπηρέτησης των επιβατών με δεδομένο αριθμό οχημάτων.

1.2. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εστιάζει στον τρόπο λειτουργίας του σχεδιασμού, επεμβαίνοντας κυρίως στις διαδικασίες που τον απαρτίζουν, τον αριθμό και τη σειρά αυτών. Πιο συγκεκριμένα, στις μέχρι τώρα έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί θεωρείται σταθερός αριθμός επιβατών των μέσων μαζικής μεταφοράς, ο οποίος οφείλει να εξυπηρετηθεί από τον σχεδιασμό. Η συγκεκριμένη επιβατική κίνηση έχει προκύψει από προηγούμενες διαδικασίες, στις οποίες προκύπτει από τις συνολικές μετακινήσεις της περιοχής μελέτης ο αριθμός των πολιτών που χρησιμοποιεί μέσα μαζικής μεταφοράς, ο οποίος στη συνέχεια λαμβάνεται ως δεδομένο στον σχεδιασμό του δικτύου. Σε κάποιες έρευνες πραγματοποιείται σταδιακή αύξηση του αριθμού αυτού ανάλογη με την υφιστάμενη. Η λογική αυτή, σύμφωνα με την παρούσα διπλωματική εργασία, έχει δύο ελαττώματα:

1. Δε λαμβάνεται υπόψιν ο πληθυσμός ο οποίος δεν έχει άλλη δυνατότητα μετακίνησης. Οι δέσμιοι χρήστες, όπως ονομάζονται, δεν ωφελούνται από τέτοιου είδους σχεδιασμό, δεδομένου ότι δεν δίνεται βαρύτητα σε αυτούς, οι οποίοι πρέπει να εξυπηρετηθούν σε πρώτο επίπεδο προκειμένου να εξασφαλίσουν το θεμελιώδες δικαίωμα στη μετακίνηση. Τα δεδομένα των χρηστών που πρέπει να εξυπηρετηθούν αφορούν μετακινήσεις που πραγματοποιούνται ήδη με τα μέσα μαζικής μεταφοράς, γεγονός που σημαίνει ότι σε αυτά αφενός συμπεριλαμβάνονται οι χρήστες που χρησιμοποιούν τα μέσα μαζικής μεταφοράς από επιλογή ή ανάγκη, χωρίς όμως να είναι δέσμιοι χρήστες, αφετέρου δεν συμπεριλαμβάνονται οι δέσμιοι χρήστες οι οποίοι δεν έχουν τρόπο μετακίνησης και άρα λείπουν από τα γενικά δεδομένα μετακινήσεων. Τα αρχικά δεδομένα του σχεδιασμού δεν είναι απαραίτητο ότι είναι λανθασμένα, όμως ο σχεδιασμός με κοινωνικό πρόσημο θα πρέπει να διαχωρίζει εμφανώς τους δέσμιους χρήστες και να δίνει προτεραιότητα σε αυτούς, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται το δικαίωμά τους στη μετακίνηση.

2. Δε λαμβάνεται σωστά υπόψιν η ένταξη νέων επιβατών στο δίκτυο. Το ποσοστό των χρηστών μέσων μαζικής μεταφοράς στην πλειοψηφία των περιπτώσεων δεν μοιράζεται ομαλά στην περιοχή μελέτης. Κάποιες περιοχές έχουν μεγαλύτερες ανάγκες σε υποδομές μέσων μαζικής μεταφοράς και κάποιες άλλες μικρότερες. Με τη σταδιακή αύξηση των επιβατών ανάλογα με τις υφιστάμενες μετακινήσεις, όπως πραγματοποιείται σε πολλές περιπτώσεις, δεν επιτυγχάνεται σχεδιασμός που ανταποκρίνεται σε μεγάλο βαθμό στην πραγματικότητα. Το αποτέλεσμα είναι να δημιουργείται ένας σχεδιασμός ο οποίος λέγεται ότι προωθεί τη βιώσιμη

κινητικότητα και ωθεί τους πολίτες να αφήσουν το ΙΧ αυτοκίνητό τους, ενώ στην πραγματικότητα δεν τους λαμβάνει καν υπόψιν στη διαδικασία του σχεδιασμού.

Η παρούσα διπλωματική καλείται να λάβει υπόψιν της τα δύο παραπάνω σημεία και να δημιουργήσει έναν ευέλικτο σχεδιασμό στον οποίο θα περιλαμβάνεται το κοινωνικό πρόσημο, ενώ ταυτόχρονα θα ωθεί ουσιαστικά τους πολίτες στη χρήση των μέσων μαζικής μεταφοράς έναντι του ιδιωτικού αυτοκινήτου, με όλα τα ωφέλη που θα έχει αυτός ο ενάρετος κύκλος στο περιβάλλον, την κοινωνία και τους κατοίκους της.

1.3. Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει την εξής δομή:

2. **Βιβλιογραφική ανασκόπηση:** Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναφέρονται οι σημαντικότερες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Ειδικότερα αναφέρονται οι μέθοδοι επίλυσης, τα αποτελέσματα και ο τομέας εστίασης κάθε έρευνας. Τέλος, παρατίθενται πίνακες με τα συγκριτικά αποτελέσματα των μεθόδων.
3. **Δεδομένα του προβλήματος:** Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο περιγράφονται τα δεδομένα, ο τρόπος λήψης τους και τα απαραίτητα στοιχεία της περιοχής μελέτης. Στα δεδομένα αυτά περιλαμβάνονται οι πίνακες Προέλευσης-Προορισμού, καθώς και το οδικό δίκτυο της περιοχής μελέτης.
4. **Μαθηματικό υπόβαθρο επίλυσης:** Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο περιγράφονται οι μαθηματικές διαδικασίες που ορίζει το πρόβλημα, καθώς και η διαδικασία επίλυσής του. Βασικό στοιχείο που περιλαμβάνεται είναι η μοντελοποίηση του προβλήματος, δηλαδή ο ορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης και οι περιορισμοί.
5. **Υλοποίηση του προβλήματος:** Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η υλοποίηση του προβλήματος σε προγραμματιστικό περιβάλλον με τη δημιουργία κώδικα λογισμικού στη γλώσσα Python3.
6. **Παρουσίαση των αποτελεσμάτων:** Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση του προβλήματος και ο σχολιασμός αυτών.
7. **Προτάσεις για μελλοντική έρευνα:** Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναφέρονται προτάσεις για μελλοντική εξέλιξη της παρούσας εργασίας. Αναφέρονται οι μελλοντικοί στόχοι του συγκεκριμένου σχεδιασμού και πιθανές τεχνικές που μπορούν να βελτιώσουν τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Το Πρόβλημα σχεδιασμού δικτύου διαδρομών Μέσων Μαζικής Μεταφοράς (Transit Route Network Design Problem, TRNDP) απασχολεί τους ερευνητές από τα τέλη της δεκαετίας του ‘60. Η πολυπλοκότητα του προβλήματος οδήγησε σε πληθώρα ερευνών με μεγάλη ποικιλία μεθόδων προσέγγισης, στόχων και παραμέτρων, όπου, με βάση τη γενικότερη σύγκριση μεθόδων, οι εφικτές λύσεις του προβλήματος βελτιώνονται συνεχώς. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας της πληροφορικής η επίλυση του προβλήματος έχει βελτιωθεί αισθητά, με την εισαγωγή νέων μεθόδων και διαδικασιών επίλυσης, καθώς και με ταχύτερη εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Για τη διευκόλυνση της δόμησης της παρούσας βιβλιογραφικής ανασκόπησης θα πραγματοποιηθεί κατηγοριοποίησης σε 2 επίπεδα με βάση τις μεταβλητές απόφασης και τη μεθοδολογία επίλυσης, αντίστοιχα.

Κατηγοριοποίηση με βάση τις μεταβλητές απόφασης

Το TRNDP, με βάση της μεταβλητές απόφασης, αποτελείται από δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο αφορά τη δημιουργία των γραμμών του δικτύου, ενώ το δεύτερο στάδιο τον καθορισμό των συχνοτήτων. Αρχικά οι έρευνες εστίαζαν σε κάποια από τις δύο κατηγορίες. Τα τελευταία χρόνια, όμως, περιλαμβάνουν και τα δύο στάδια. Προκειμένου να συστηματοποιηθούν οι προσεγγίσεις του προβλήματος, οι *Van Nes et al. (1988)* προσπάθησαν να ομαδοποιήσουν τα μαθηματικά πρότυπα επίλυσης στις εξής κατηγορίες:

1. Αναλυτικά πρότυπα προσδιορισμού συγκεκριμένων παραμέτρων του συστήματος
2. Πρότυπα προσδιορισμού των υπό ένταξη συνδέσμων (links) στο δίκτυο
3. Πρότυπα σχεδιασμού των γραμμών
4. Πρότυπα καθορισμού συχνοτήτων δεδομένων ομάδων γραμμών
5. Πρότυπα που περιλαμβάνουν τον σχεδιασμό των γραμμών και τον καθορισμό των συχνοτήτων σε δύο φάσεις
6. Πρότυπα που περιλαμβάνουν τον σχεδιασμό των γραμμών και τον καθορισμό των συχνοτήτων ταυτόχρονα σε μία φάση

Τα τελευταία χρόνια, και συγκεκριμένα από το 2007, οι έρευνες έχουν επικεντρωθεί στα στις κατηγορίες 3 και 6, δηλαδή στο σχεδιασμό των γραμμών του δικτύου μόνο ή με ταυτόχρονο καθορισμό των συχνοτήτων. Σε αυτό συνέβαλε η έντονη ανάπτυξη των ευρετικών (heuristics) και μεθευρετικών (metaheuristics) αλγορίθμων, οι οποίοι, με τη

δυνατότητα εύρεσης πληθώρας λύσεων, βελτίωσαν κατά πολύ τα αποτελέσματα του σχεδιασμού.

Σε αυτή την εργασία η κατηγοριοποίηση με βάση τις μεταβλητές απόφασης παρουσιάζεται ως εξής:

1. Σχεδιασμός γραμμών συγκοινωνιακού δικτύου
2. Καθορισμός συχνοτήτων γραμμών
3. Ταυτόχρονος σχεδιασμός γραμμών και καθορισμός συχνοτήτων
4. Καθορισμός δρομολογίων

Κατηγοριοποίηση με βάση τις μεθόδους επίλυσης

Οι μέθοδοι επίλυσης του TRNDP μπορούν να συνοψιστούν σε δύο κατηγορίες *(Kepaptsoglou and Karlaftis, 2009)*, τις συμβατικές (conventional) και τις ευρετικές (heuristic). Τα τελευταία χρόνια οι περισσότερες προσεγγίσεις πραγματοποιούνται με τη χρήση ευρετικών μεθόδων, λόγω του γεγονότος ότι ανταποκρίνονται καλύτερα στη συνδυαστική φύση του προβλήματος *(Israeli and Ceder, 1993)*, ενώ ταυτόχρονα η διατύπωση του προβλήματος μέσω μαθηματικού προγραμματισμού είναι δύσκολη *(Chackroborty, 2003)*.

Σε αυτή την εργασία η κατηγοριοποίηση με βάση τις μεθόδους επίλυσης παρουσιάζεται ως εξής:

1. Συμβατικές μέθοδοι
   α) Αναλυτικές μέθοδοι
   β) Μέθοδοι μαθηματικού προγραμματισμού
2. Ευρετικές μέθοδοι
3. Συνδυασμός συμβατικών και ευρετικών μεθόδων

Για περισσότερες πληροφορίες μπορεί κανείς να ανατρέξει στα review papers των *Kepaptsoglou and Karlaftis (2009)*, *Schobel (2011)* και *Farahani (2013)*.

2.1. Σχεδιασμός γραμμών συγκοινωνιακού δικτύου

2.1.1.α. Συμβατικές αναλυτικές μέθοδοι

Στην κατηγορία αυτή εντάσσεται η έρευνα των *Estrada et al. (2011)*, στην οποία σχεδιάστηκε ένα εξιδανικευμένο δίκτυο για λεωφορεία υψηλής απόδοσης (High Performance Bus Service, HBS). Για τη συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκε ορθογωνικό δίκτυο διαστάσεων $D_x * D_y$ ($D_x \geq D_y$) με πυρήνα μορφής κανάβου με οδούς δύο κατευθύνσεων και μεταξύ τους αποστάσεων s_x και s_y, έτσι ώστε να διατηρείται σταθερή η αναλογία των δύο διαστάσεων στο ορθογώνιο παραλληλόγραμμο. Η απόσταση των διαδοχικών στάσεων ισούται με s, ενώ οι αποστάσεις μεταξύ διαδοχικών γραμμών ορίζονται $s_x = p_x * s$ και $s_y = p_y * s$ (p_x, p_y ακέραιοι), ανάλογα με τον άξονα στον οποίο βρίσκονται. Ακόμα, στην επίλυση χρησιμοποιούνται και οι αδιάστατοι όροι $\alpha_x = d_x/D_x$ και $\alpha_y = d_y/D_y$, ενώ πραγματοποιείται και η παραδοχή ότι ο χρονικός διαχωρισμός H των γραμμών είναι ίσος για όλες. Η επίλυση του προβλήματος πραγματοποιήθηκε με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους φορέα και χρήστη ως προς τις μεταβλητές H, s, s_x, s_y, α_x, α_y.

2.1.1.β. Συμβατικές μέθοδοι μαθηματικού προγραμματισμού

Οι *Marín and Jaramillo (2008)* χρησιμοποίησαν τη διάσπαση Benders, μια μέθοδο μαθηματικού προγραμματισμού για την προσέγγισή τους, η οποία δοκιμάστηκε στην Σεβίλλη της Ισπανίας. Πιο συγκεκριμένα, χώρισαν το πρόβλημα σε δύο υποπροβλήματα. Το πρώτο και κύριο υποπρόβλημα (Master Model, MM) αφορούσε τον προσδιορισμό εφικτού δικτύου (πρόβλημα τοποθέτησης – location problem), ενώ το δεύτερο (Sub Model - SM) αφορούσε τον καταμερισμό της ζήτησης (πρόβλημα κατανομής – allocation problem). Η διάσπαση κατά Benders είναι μια επαναληπτική διαδικασία μεταξύ του Master Model και του Sub Model στην οποία σε κάθε επανάληψη οι δυϊκές μεταβλητές του δεύτερου μοντέλου καθορίζουν τις “περικοπές βελτιστοποίησης” ή “περικοπές εφικτότητας” (Optimality Benders Cuts – OBC ή Feasibility Benders Cuts – FBC). Μια επίσης σημαντική παραλλαγή της διάσπασης Benders είναι η Επιταχυνόμενη Διάσπαση Benders (Accelerated Benders Decomposition), η οποία μπορεί να επιταχύνει τη σύγκλιση των μοντέλων.

Οι *Černa et al. (2011)* δοκίμασαν πέντε διαφορετικές μεθόδους επίλυσης του προβλήματος κάλυψης της μεταφορικής ζήτησης με τη δημιουργία μίας μόνο γραμμής θεωρώντας δεδομένα το δίκτυο G και τη ζήτηση D. Ο στόχος του προβλήματος ήταν η ελαχιστοποίηση

του μήκους της γραμμής έτσι ώστε η μέση απόσταση των στάσεων από τα σημεία προέλευσης των επιβατών να μην υπερβαίνει ένα όριο λ.

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν η πρώτη και η πέμπτη μέθοδος επίλυσης. Οι υπόλοιπες αποτελούν ευρετικές μεθόδους και θα αναλυθούν παρακάτω στην αντίστοιχη κατηγορία. Η πρώτη μέθοδος ονομάζεται Ακριβής Μέθοδος (Exact Method – EM) και βασίζεται στην επίλυση ως Πρόβλημα του Περιοδεύοντος Πωλητή (Open Travelling Salesman Problem – OTSP). Η πέμπτη μέθοδος μετατρέπει το πρόβλημα σε Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (Integer Linear Programming Model).

2.1.2. Ευρετικές – Μεθευρετικές μέθοδοι

Οι *Mauttone and Urquhart (2009)* ανέπτυξαν μια μέθοδο προσανατολισμένη στον καθορισμό των γραμμών του δικτύου. Ο αλγόριθμος που πρότειναν ονομάζεται Αλγόριθμος Εισαγωγής Ζευγών (Pair Insertion Algorithm – PIA) και βασίζεται στον Αλγόριθμο Δημιουργίας Διαδρομών (Route Generation Algorithm – RGA) των *Baaj and Mahmassani (1995)*. Ο PIA, λαμβάνοντας υπόψη τη διαζωνική φύση της ζήτησης, εισάγει τους κόμβους ανά ζεύγη, σε αντίθεση με προηγούμενες περιπτώσεις όπου εισάγονταν μεμονωμένα, σε καινούργιες ή υφιστάμενες γραμμές, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απαιτούμενες μετεπιβιβάσεις. Ο αλγόριθμος PIA εφαρμόστηκε στην πόλη Rivera της Ουρουγουάης.

Οι *Fan and Mumford (2010)* χρησιμοποίησαν το πρότυπο ελβετικό δίκτυο του Mandl για την εφαρμογή μια ευρετικής μεθόδου η οποία αναλύεται σε δύο στάδια. Αρχικά κατασκευάζεται ένα δίκτυο ως σύνολο των συντομότερων διαδρομών με τη μεγαλύτερη ζήτηση που μπορούν να εξυπηρετήσουν χωρίς να υπολογίζονται οι μετεπιβιβάσεις. Στη συνέχεια, κάθε σύνολο γραμμών S που παράγεται υφίσταται μικρές τροποποιήσεις με τη χρήση του αλγορίθμου Make – Small – Change, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός νέου συνόλου S’. Με βάση την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για τα S, S’ και με την εφαρμογή είτε του απλού Αλγορίθμου του Ορειβάτη (Hill Climbing – HC) είτε του αλγορίθμου Προσομοιωμένης Ανόπτησης (Simulated Annealing – SA) επιλέγεται το ένα από τα δύο σύνολα S, S’ και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Οι *Černa et al. (2011)* παρουσίασαν, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, πέντε διαφορετικές μεθόδους για την επίλυση του προβλήματος κάλυψης της μεταφορικής ζήτησης με μία μόνο γραμμή. Η δεύτερη, η τρίτη και η τέταρτη μέθοδος είναι ευρετικές. Πιο συγκεκριμένα, η δεύτερη είναι η Γενική Άπληστη Ευρετική Μέθοδος (General Greedy Heuristics – GGH), η τρίτη είναι η Άπληστη Ευρετική Μέθοδος Γειτονιάς (Neighbourhood Greedy Heuristics – NGH) και η τέταρτη είναι η Συνδυασμένη Ευρετική Μέθοδος (Combined Heuristics – CH).

Οι *Euchi and Mraihi (2012)* διερεύνησαν το Πρόβλημα Δρομολόγησης Σχολικού Λεωφορείου (School Bus Routing Problem – SBRP) για την ευρύτερη περιοχή της Τύνιδας (Great Tunis) με τη μέθοδο της Υβριδικής Αποικίας Τεχνητών Μυρμηγκιών (Hybrid Artificial Ant Colony – HAAC), μία μέθοδο που συνδυάζει τον αλγόριθμο της Αποικίας Τεχνητών Μυρμηγκιών (Artificial Ant Colony – AAC) και την Έρευνα Μεταβλητής Γειτονιάς (Variable Neighbourhood Search – VNS). Η μέθοδος αποτελείται από πέντε βήματα. Αρχικά, προσδιορίζεται η αρχική λύση του προβλήματος, η οποία αποτελείται από μία συμβολοσειρά (string) μήκους ίσου με τον αριθμό των στάσεων, όπου η τιμή κάθε στάσης αντιστοιχεί στο λεωφορείο που θα διέρχεται από αυτή. Στη συνέχεια, η αρχική λύση βελτιώνεται με τη μέθοδο της Δυναμικής Κατασκευής (Dynamic Construction) και, πιο συγκεκριμένα, με χρήση Δυναμικής Αλυσίδας Λεωφορειακών Στάσεων (Dynamic Chain of Bus Stops), σύμφωνα με την οποία εισάγονται στάσεις σε ήδη κατασκευασμένες γραμμές. Έπειτα, πραγματοποιείται Τοπική Ενημέρωση Φερομόνης (Local Pheromone Update) και στη συνέχεια αναζητάται με εφαρμογή ευρετικής μεθόδου Τοπική Γειτονιά με Ανταλλαγή (Swap Neighbourhood Local Search Heuristic), έτσι ώστε να αποφεύγεται ο εγκλωβισμός σε τοπικά βέλτιστα. Τέλος, πραγματοποιείται Καθολική Ενημέρωση Φερομόνης (Global Pheromone Update).

Οι *Roca-Riu et al. (2012)* χρησιμοποίησαν την μεθευρετική μέθοδο Αναζήτησης με Ταμπού (Tabu Search – TS) με στόχο τη χωροθέτηση γραμμών και στάσεων υπεραστικών λεωφορείων στην πόλη της Βαρκελώνης. Πιο συγκεκριμένα, θεωρείται περιοχή μελέτης A, στην οποία βρίσκονται οι στάσεις λεωφορειακών γραμμών και οι σταθμοί μετεπιβίβασης, καθώς και ο γράφος G(H;E), όπου H οι κόμβοι και E οι σύνδεσμοι του υφιστάμενου δικτύου. Οι κόμβοι διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: α) υποσύνολο I: οι “είσοδοι” της πόλης (City Gates), β) υποσύνολο J: τα κεντροειδή των ζωνών παραγωγής και έλξης μετακινήσεων και γ) υποσύνολο K: οι εν δυνάμει στάσεις των υπεραστικών λεωφορείων στην πόλη, οι οποίες ταυτίζονται με τις υφιστάμενες στάσεις αστικών λεωφορείων και σιδηρόδρομων. Ισχύει ότι $I \subset K$. Επιπλέον, ορίζεται το σύνολο G των κόμβων προέλευσης εκτός πόλης του αντίστοιχου πίνακα O-D. Με τη χρήση του Αλγορίθμου του Dijkstra (1959) εντοπίζονται οι ελάχιστες διαδρομές R μεταξύ όλων των πιθανών στάσεων.

Σε κάθε επανάληψη επιλέγεται μία στάση και αξιολογούνται οι πιθανές “κινήσεις” μεταξύ της στάσης αυτής και ενός πλήθους από τις κοντινότερές της και επιλέγεται η καλύτερη. Οι κινήσεις που πραγματοποιούνται μπορεί να είναι: α) αλλαγή της στάσης τερματισμού της γραμμής, β) αφαίρεση της στάσης τερματισμού και αντικατάσταση της νέας στάσης τερματισμού, γ) προσθήκη επιπλέον στάσης στο τέλος της γραμμής και δ) αλλαγή ενδιάμεσης στάσης της γραμμής.

Οι *Nikolić and Teodorović (2013)* βασίστηκαν στην έρευνά τους στη Νοημοσύνη Σμήνους (Swarm Intelligence) και, πιο συγκεκριμένα, στη μέθοδο Βελτιστοποίησης Αποικίας Μελισσών (Bee Colony Optimization – BCO). Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει ως βασική ιδέα τη θεώρηση ενός τεχνητού σμήνους μελισσών οι οποίες εξερευνούν το διαθέσιμο χώρο λύσεων με τον εξής τρόπο: Κάθε μέλισσα δημιουργεί μια αρχική λύση και στη συνέχεια ανταλλάσει πληροφορίες με τα υπόλοιπα μέλη του σμήνους, έτσι ώστε να εντοπιστούν οι λύσεις με τις καλύτερες τιμές στην αντικειμενική συνάρτηση. Το αποτέλεσμα είναι η συγκέντρωση των μελισσών στις περιοχές όπου εντοπίζονται οι λύσεις αυτές. Στη συνέχεια η κάθε μέλισσα παράγει μια νέα λύση ή βελτιώνει μία από τις ήδη υπάρχουσες. Ο αλγόριθμος αποτελείται από δύο φάσεις, οι οποίες επαναλαμβάνονται μέχρι να ικανοποιηθεί η συνθήκη τερματισμού. Οι φάσεις αυτές είναι:

α) Κίνηση προς τα εμπρός (Forward Pass): Κάθε μέλισσα κατασκευάζει νέες υποψήφιες λύσεις, είτε απόλυτα καινούριες, είτε μέσω τροποποίησης των υφιστάμενων λύσεων.

β) Κίνηση προς τα πίσω (Backward Pass): Οι μέλισσες συγκεντρώνονται στην κυψέλη και ανταλλάσσουν πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα των λύσεων. Στη συνέχεια, κάθε λύση διατηρείται ή εγκαταλείπεται με πιθανότητα η οποία προσδιορίζεται από την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε σύγκριση με τις υπόλοιπες λύσεις.

Η αρχική λύση κατασκευάζεται με τον απλό αλγόριθμο Άπληστης Αναζήτησης (Greedy Algorithm), ο οποίος εντάσσει στάσεις με υψηλή ζήτηση στην ίδια γραμμή, ώστε αυτή να ικανοποιείται απευθείας. Ωστόσο, η διαφοροποίηση της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε από την κλασσική μέθοδο επίλυσης έγκειται στην ύπαρξη δύο διαφορετικών ειδών μελισσών (Type 1, Type 2), τα οποία διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τον τρόπο που τροποποιούν τις λύσεις.

Οι *Nayeem et al. (2014)* βασίστηκαν στη μέθοδο των *Nikolić and Teodorović (2013)*, με βασική διαφοροποίηση στην επίλυση να αποτελεί η χρήση του ελιτισμού. Για το αρχικό δίκτυο πραγματοποιήθηκε η εξής διαδικασία:

α) Υπολογίστηκαν οι συντομότερες διαδρομές με τον αλγόριθμο του Dijkstra (1959) για όλα τα ζεύγη Προέλευσης – Προορισμού και η ζήτηση που μπορεί η κάθε μία να εξυπηρετήσει χωρίς μετεπιβίβαση.

β) Ως πρώτη γραμμή επιλέχθηκε αυτή με τη μεγαλύτερη εν δυνάμει ζήτηση που μπορεί να εξυπηρετήσει. Στη συνέχεια, τα ζεύγη O-D που μπορούν να εξυπηρετηθούν από τη γραμμή αυτή διαγράφονται.

γ) Το βήμα (β) επαναλαμβάνεται μέχρις ώτου να συμπληρωθεί ο απαιτούμενος αριθμός γραμμών.

Στη συνέχεια δημιουργείται ένας αρχικός πληθυσμός από αντίγραφα του αρχικού δικτύου. Το δίκτυο στη συνέχεια αξιολογείται με βάση την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και

ένας αριθμός από τις καλύτερες λύσεις του πληθυσμού (elite) μεταβιβάζονται στην επόμενη γενιά. Έπειτα πραγματοποιούνται διασταυρώσεις (crossovers) και μεταλλάξεις (mutations) μεταξύ των δικτύων και μίας γραμμής κάθε δικτύου, αντίστοιχα, προκειμένου να συμπληρωθεί ο πληθυσμός. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όσες φορές οριστούν από τον χρήστη.

Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε στο πρότυπο ελβετικό δίκτυο του Mandl, καθώς και στο μεγαλύτερο δίκτυο που χρησιμοποίησε ο Mumford (2013a). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι αρκετά ικανοποιητικά, όμως η αξιοπιστία τους είναι μειωμένη εξαιτίας της έλλειψης ορίου αριθμού κόμβων σε κάθε γραμμή, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται γραμμές με πολύ μεγάλο αριθμό κόμβων.

Οι Amiripour et al. (2014) διερεύνησαν τη χρήση Γενετικού Αλγορίθμου (GA) στην βελτιστοποίηση υφιστάμενου συγκοινωνιακού δικτύου. Η έρευνα αυτή βασίστηκε σε τρεις αρχές οι οποίες, όπως υποστηρίζουν, ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα των περιπτώσεων που ζητείται η βελτιστοποίηση υφιστάμενου δικτύου και όχι δημιουργία ενός νέου: διατήρηση της υφιστάμενης μορφής του δικτύου όσο το δυνατόν περισσότερο, συμπερίληψη προτάσεων από επαγγελματίες και προσθήκη ποινής για κάθε μετεπιβίβαση (transfer penalty). Η προσέγγιση επίλυσης αποτελείται από τέσσερα μέρη:

α) Δημιουργία συνόλου υποψήφιων γραμμών Το σύνολο υποψήφιων γραμμών R δημιουργείται από γραμμές που επιλέγονται με βάση κάποια πιθανότητα από τρία υποσύνολα. Το πρώτο υποσύνολο R_C περιλαμβάνει τις υφιστάμενες γραμμές του δικτύου, από τις οποίες διαχωρίζονται εκ των προτέρων οι διαδρομές που πρέπει να διατηρηθούν στην τελική λύση, κυρίως για ιστορικούς και κοινωνικούς λόγους, και στις οποίες λαμβάνεται τιμή πιθανότητας ίση με 1. Για τις υπόλοιπες γραμμές του R_C υπολογίζεται η πιθανότητα επιλογής με βάση την υφιστάμενη επιβατική τους κίνηση. Το δεύτερο υποσύνολο R_{KSP} αποτελείται από υποψήφιες γραμμές που προέκυψαν από την εφαρμογή του αλγορίθμου K-shortest path με βάση τη ζήτηση και τα όρια μήκους γραμμών που τέθηκαν, έτσι ώστε να μην υπάρχουν πολύ μικρές ή μεγάλες γραμμές. Στο τρίτο υποσύνολο R_E προστίθενται οι γραμμές που προτείνονται από επαγγελματίες με πρακτική εμπειρία στην περιοχή. Οι γραμμές αυτές δεν θα ενταχθούν με απόλυτη βεβαιότητα στο τελικό δίκτυο, όμως αποτελούν καλύτερες λύσεις από αυτές του R_{KSP}, γι' αυτό και έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα επιλογής. Το σύνολο R θα δημιουργηθεί από γραμμές των τριών συνόλων με συγκεκριμένη πιθανότητα επιλογής για την κάθε μία.

β) Σχεδιασμός του δικτύου με χρήση γενετικού αλγορίθμου. Η μέθοδος συμπεριλαμβάνει χρήση του ελιτισμού (Nayeem et al., 2014) σε κάθε 20η γενιά.

γ) Έλεγχος εφικτότητας των γραμμών του R_{KSP}: Ο έλεγχος περιλαμβάνει κυρίως την ένταξη κάθε γραμμής στο δίκτυο σε πρακτικά ζητήματα, όπως η δυνατότητα

στροφών και η επιρρέπεια σε καθυστερήσεις λόγω κυκλοφοριακών προβλημάτων. Οι γραμμές που δεν πληρούν τα κριτήρια διαγράφονται εντελώς από το R_{KSP}.

δ) Επέκταση των διαδρομών με χρήση αλγορίθμου επέκτασης (Mahmassani, 1995).

Η συγκεκριμένη προσέγγιση εφαρμόστηκε τόσο στο πρότυπο ελβετικό δίκτυο του Mandl όσο και στην πόλη Mashhad του Ιράν, εξάγοντας αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα.

2.1.3. Συνδυασμός Συμβατικών και Ευρετικών μεθόδων

Οι *Curtin and Biba (2011)* παρουσίασαν μία από τους πιο χαρακτηριστικούς συνδυασμούς συμβατικών και ευρετικών μεθόδων επίλυσης με τη χρήση του μοντέλου TRANSMax (Transit Route Arc-Node Service Maximization Model), το οποίο εφαρμόστηκε στην περιοχή Richardson του Τέξας. Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος βασίζεται στη δομή του Προβλήματος του Περιοδεύοντος Πωλητή (Travelling Salesman Problem) και του Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων (Vehicle Routing Problem). Η τακτική επίλυσης είναι αυτή του “διαίρει και βασίλευε” (Divide-and-Conquer), σύμφωνα με την οποία το πρόβλημα διαιρείται σε μικρότερα επιμέρους προβλήματα, έτσι ώστε να επιταχυνθεί η διαδικασία επίλυσης και, ταυτόχρονα, να προκύψουν πολλές εναλλακτικές γραμμές με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

Η διαδικασία επίλυσης αποτελείται από τρία στάδια:

α) Με τη χρήση Ευρετικού Αλγορίθμου Απομείωσης Δικτύου (Network Reduction Heuristic) περιορίζεται ο αριθμός των κόμβων και συνδέσμων που θα αποτελέσουν το δίκτυο

β) Καθορίζεται το εύρος των δυνατών τιμών για το πλήθος R των συνδέσμων της βέλτιστης γραμμής, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρική μορφή της

γ) Εντοπίζεται η βέλτιστη λύση για κάθε μία από τις δυνατές τιμές του R με συνδυασμό των μεθόδων Simplex και “Κλάδου και Φράγματος” (Branch and Bound).

2.2. Καθορισμός συχνοτήτων γραμμών

2.2.1. Συμβατικές μέθοδοι

Σημαντική έρευνα σε αυτή την κατηγορία είναι αυτή των *Torres et al. (2011)*, η οποία εξετάζει την επιρροή της τοπολογίας του δικτύου στο Πρόβλημα Κάλυψης της Ζήτησης (Demand Covering Model – DCM) σε πολυωνυμικό ή μη χρόνο. Πιο συγκεκριμένα, διερευνήθηκαν διαφορετικές περιπτώσεις δικτύων τοπολογίας αστέρα και δέντρου με μη προσανατολισμένες διαδρομές, οι οποίες εξυπηρετούν μία ή δύο γειτονιές (1-NB και 2-NB αντίστοιχα). Στη συνέχεια, το πρόβλημα επιλύθηκε ως πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού για το δίκτυο του Quito, το οποίο υποδιαιρέθηκε σε τρία επιμέρους δίκτυα με τοπολογία αστέρα (Subdivided Star).

2.2.2. Ευρετικές – Μεθευρετικές μέθοδοι

Οι *Gallo et al. (2011)* επίλυσαν το πρόβλημα για το δίκτυο μετρό της ιταλικής πόλης Campania με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

α) Με Ευρετικό Αλγόριθμο Τοπικής Αναζήτησης (Heuristic Local Search Algorithm): Αρχικά πραγματοποιείται βελτιστοποίηση της συχνότητας κάθε γραμμής ξεχωριστά, θεωρώντας σταθερές τις συχνότητες των υπόλοιπων γραμμών. Οι βέλτιστες συχνότητες αποτελούν την αρχική λύση, η οποία τροποποιείται με τη χρήση του Αλγόριθμου Τοπικής Αναζήτησης (Neighbourhood Search – NS). Από τις παραγόμενες λύσεις επιλέγεται αυτή που βελτιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση.

β) Με Διασκορπισμένη Αναζήτηση (Scatter Search), η οποία χρησιμοποιεί τον HLSA για να παραγάγει κατ' επανάληψη βελτιωμένα σύνολα λύσεων (τοπικά βέλτιστα) με βάση προηγούμενα σύνολα.

γ) Με Γενετικό Αλγόριθμο (Genetic Algorithm – GA), με την εφαρμογή των τελεστών Διασταύρωσης (Crossover) και Μετάλλαξης (Mutation).

Οι *Ferguson et al. (2011)* χρησιμοποίησαν επίσης Γενετικό Αλγόριθμο για τον καθορισμό των συχνοτήτων, με στόχο την επίτευξη της ισότητας (equity) ως προς τη δυνατότητα πρόσβασης των μετακινούμενων για βασικές δραστηριότητες (εργασία, υγεία, αγορές). Η ζήτηση λαμβάνεται υπόψη με σχετική αβεβαιότητα (demand uncertainty), έτσι ώστε να συνυπολογιστεί η μεταβλητότητα του αριθμού των μετακινούμενων και των σημείων προορισμού. Η επίλυση του προβλήματος για μια μεσαίου μεγέθους μητροπολιτική πόλη

των ΗΠΑ έδειξε ότι, όσο μεγαλύτερη η αβεβαιότητα της ζήτησης, τόσο μεγαλύτερη είναι η ανάγκη αυτή να λαμβάνεται υπόψη.

2.3. Ταυτόχρονος σχεδιασμός γραμμών και καθορισμός συχνοτήτων

2.3.1. Συμβατικές μέθοδοι

Λόγω της πολυπλοκότητας που παρουσιάζει ο ταυτόχρονος σχεδιασμός του δικτύου και ο καθορισμός των συχνοτήτων, οι ευρετικές και μεθευρετικές μέθοδοι είναι οι πλέον κατάλληλες για τη λύση του συγκεκριμένου προβλήματος. Για το λόγο αυτό, οι συμβατικές προσεγγίσεις έχουν περιοριστεί σημαντικά και δεν είναι άξιες αναφοράς.

2.3.2. Ευρετικές – Μεθευρετικές μέθοδοι

Οι *Zhao and Zeng (2008)* παρουσίασαν τη μέθοδο ISTG, η οποία βασίζεται στον επαναληπτικό προσδιορισμό ενός τοπικού διαστήματος αναζήτησης λύσεων και έναν ευρετικό αλγόριθμο ο οποίος συνδυάζει τις τεχνικές Ενσωματωμένης Προσομοιωμένης Ανόπτησης (Integrated Simulated Annealing), Αναζήτηση με Ταμπού (Tabu Search) και Άπληστη Αναζήτηση (Greedy Search). Για τη συγκεκριμένη έρευνα μερικοί από τους κόμβους του δικτύου χαρακτηρίστηκαν “Master Nodes” και εντάχθηκαν στο “Master Path”. Με δεδομένα τα master paths παράγονται νέες διαδρομές με τοπική αναζήτηση. Το σύνολο αυτών των γραμμών P1(p) αποτελεί το τοπικό διάστημα διαδρομών (Local Path Space) του master path p. Ταυτόχρονα παράγεται ένα δεύτερο σύνολο διαδρομών P2(p) για την εξασφάλιση ότι όλοι οι κοντινοί κόμβοι του master path θα συμπεριληφθούν στις παραγόμενες γραμμές. Η αναζήτηση με ταμπού και η άπληστη αναζήτηση επιταχύνουν τη διαδικασία επίλυσης σε σχέση με τη μεμονωμένη εφαρμογή της ενσωματωμένης προσομοιωμένης ανόπτησης. Η έρευνα αυτή εφαρμόστηκε και απέδειξε τις δυνατότητές της τόσο σε απλά υποθετικά δίκτυα, όσο και στο πρότυπο ελβετικό δίκτυο του Mandl.

Οι *Fan et al. (2008)* παρουσίασαν μια μέθοδο επίλυσης του προβλήματος με το συνδυασμό τριών διαδικασιών:

α) Αρχική Διαδικασία Παραγωγής Υποψήφιων Γραμμών (Initial Candidate Route Set Generation Procedure – ICRSGP): Με τη χρήση του αλγορίθμου συντομότερης

διαδρομής του Dijkstra (1959) και τον αλγόριθμο των k-συντομότερων διαδρομών του Yen (1971) παράγονται εφικτές γραμμές.

β) Διαδικασία Ανάλυσης Δικτύου (Network Analysis Procedure – NAP): Κατανέμεται η επιβατική κίνηση στο δίκτυο, καθορίζονται οι συχνότητες και υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

γ) Μεθευρετική Διαδικασία Αναζήτησης (Metaheuristic Search Procedure – MSP): Με συνδυασμό των αποτελεσμάτων των δύο προηγούμενων διαδικασιών επιλέγεται, σε κάθε επανάληψη, το βέλτιστο σύνολο γραμμών. Η επιλογή των καλύτερων λύσεων πραγματοποιείται με συνδυασμό Γενετικού Αλγορίθμου (GA) και Προσομοιωμένης Ανόπτησης (SA).

Οι Mauttone and Urquhart (2009) χρησιμοποίησαν τη Μεθευρετική Διαδικασία Άπληστης Τυχαιοποιημένης Προσαρμοστικής Αναζήτησης (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure – GRASP), η οποία βασίζεται στην επαναλαμβανόμενη εκτέλεση δύο διαδικασιών, της κατασκευής λύσεων και της τοπικής αναζήτησης. Αρχικά, υπολογίζεται η συντομότερη διαδρομή μεταξύ όλων των ζευγών κόμβων του δικτύου G και στη συνέχεια ακολουθεί η επαναληπτική διαδικασία.

Η κατασκευή λύσεων πραγματοποιείται με τη χρήση του Αλγορίθμου Εισαγωγής Ζευγών (PIA), τον οποίο είχαν δημοσιεύσει νωρίτερα (βλ. 2.1.2). Μέσω της τοπικής αναζήτησης υπολογίζεται ένα σχεδόν βέλτιστο σύνολο συχνοτήτων F για δεδομένη σχέση μεταξύ του κόστους φορέα και του κόστους χρηστών. Πιο συγκεκριμένα, τροποποιώντας τη συχνότητα κάθε γραμμής μιας λύσης S προκύπτει μια “γειτονιά” NS της λύσης, από την οποία με τοπική αναζήτηση βρίσκεται η λύση που ελαχιστοποιεί την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Κάθε φορά που η τιμή αυτή βελτιώνεται, τότε η εξερεύνηση της γειτονιάς τερματίζεται και η διαδικασία συνεχίζεται.

Ο συνδυασμός των τεχνικών PIA και GRASP εφαρμόστηκαν με ικανοποιητικά αποτελέσματα τόσο στο πρότυπο ελβετικό δίκτυο του Mandl, όσο και στο δίκτυο της πόλης Rivera.

Οι *Shinamoto et al. (2010)* χρησιμοποίησαν Γενετικό Αλγόριθμο Ελιτίστικης Μη Κυριαρχούμενης Διαλογής (Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm – NSGA-II) για την αξιολόγηση του υφιστάμενου δικτύου της Hiroshima, διατηρώντας σταθερές τις θέσεις των στάσεων. Διακρίνονται έξι κατηγορίες κόμβων: προέλευσης (origin node), προορισμού (destination node), στάσης (stop), επιβίβασης (boarding node), αποβίβασης (alighting node) και αποτυχημένης επιβίβασης (failure node), καθώς και επτά κατηγορίες συνδέσμων: γραμμής (line arc), επιβιβαζόμενης ζήτησης (boarding demand arc), επιβίβασης (boarding arc), αποβίβασης (alighting arc), στάσης (stopping arc), βαδίσματος (walking arc) και αποτυχημένης επιβίβασης (failure arc). Το βασικό χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης έρευνας είναι ότι, σε αντίθεση με τις περισσότερες αυτής της κατηγορίας, το

γενικευμένο κόστος μιας διαδρομής συμπεριλαμβάνει και το έμμεσο κόστος αποτυχίας επιβίβασης.

Οι *Han et al. (2011)* εφάρμοσαν στο πρότυπο ελβετικό δίκτυο του Mandl την παρακάτω διαδικασία τριών βημάτων για τον σχεδιασμό των γραμμών και τον καθορισμό των συχνοτήτων:

α) Παραγωγή Υποψήφιων Λύσεων (Candidate Route Generation): Δημιουργείται σύνολο γραμμών στο οποίο περιλαμβάνονται διαφορετικά είδη γραμμών οι οποίες προκύπτουν μέσω των Αλγορίθμων Συντομότερης Διαδρομής (Shortest Path ή Minimum Time – MT), της Διαδρομής Μέγιστης Ροής (Maximal Flow Path ή Minimum Demand – MD), της Διαδρομής Μέγιστης Ροής ανά Ελάχιστο Χρόνο (Maximal Flow Path per Minimum Time – MDMT), της Διαδρομής Μέγιστης Ροής ανά Ελάχιστο Μήκος Γραμμής (Maximal Flow Path per Minimum Route Length – MDML) και της Διαδρομής Μέγιστης Ροής ανά Ελάχιστο Κόστος (Maximal Flow Path per Minimum Cost – MDMC).

β) Εφαρμογή μεθευρετικών μεθόδων μέσω Γενετικών Αλγορίθμων (GA), Προσομοιωμένης Ανόπτησης (SA) και Αναζήτησης με Ταμπού (TS).

γ) Ανάλυση και Αξιολόγηση Γραμμών (Route Analysis – Evaluation).

Οι *Blum and Mathew (2011)* και οι *Yu et al. (2012)* χρησιμοποίησαν τη Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization – ACO) συνδυαστικά με άλλες μεθόδους, έτσι ώστε να διαμορφώσουν τη μέθοδο του Ευφυούς Πράκτορα (Intelligent Agent), την οποία και εφάρμοσαν στο δίκτυο του Δελχί της Ινδίας και στο πρότυπο ελβετικό δίκτυο του Mandl. Η μέθοδος αυτή αποτελείται από δύο φάσεις, αυτή της αρχικοποίησης και την επαναληπτική.

α) Αρχικοποίηση: Κατασκευάζεται ένα σύνολο πιθανών γραμμών σύμφωνα με τον αλγόριθμο της συντομότερης διαδρομής και τη μέθοδο ACO. Στη συνέχεια, οι Παράγοντες Δημιουργίας (Creation Agents) επιλέγουν υποσύνολα των γραμμών και κατασκευάζουν υποψήφια δίκτυα. Διακρίνονται τέσσερα είδη Παραγόντων Δημιουργίας: Δένδρου (Tree Agent), Κύριας Γραμμής (Main Line Agent), Τυχαίας Επιλογής Γραμμής (Random Route Selection Agent) και Εξυπηρέτησης Ζήτησης (Demand Satisfaction Agent). Έπειτα υπολογίζεται το κόστος για το φορέα και τους χρήστες από την Μονάδα Αξιολόγησης Λύσεων (Solution Evaluation Module), με βάση τον καταμερισμό των επιβατών στο δίκτυο.

β) Επαναληπτική φάση: Λειτουργούν οι Παράγοντες Τροποποίησης (Modification Agents) και ο Παράγοντας Διαγραφής (Deletion Agent). Οι παράγοντες τροποποίησης βασίζονται σε Ευρετικές Μεθόδους Τροποποίησης Γραμμών (Route Operator Heuristics) ή Επιλογής και Αφαίρεσης Γραμμών (Route Selection and

Removal Heuristics) και Συχνοτήτων Γραμμών (Route Frequency Heuristics), με τον παράγοντα διαγραφής να διαγράφει τις λύσεις με τη χαμηλότερη απόδοση. Το αποτέλεσμα είναι η διατήρηση ενός συνόλου ισοδύναμων κατά Pareto λύσεων οι οποίες ελαχιστοποιούν το κόστος του χρήστη για διάφορα επίπεδα κόστος φορέα.

Οι *Szeto and Wu (2011)* πρότειναν μία μέθοδο με ταυτόχρονη χρήση γενετικού αλγορίθμου για τον σχεδιασμό των γραμμών και ευρετικού αλγορίθμου τοπικής αναζήτησης για τον καθορισμό των συχνοτήτων. Ως δεδομένα λαμβάνονται οι υφιστάμενες στάσεις, οι τερματικοί σταθμοί και ένας ενδιάμεσος κόμβος για την πραγματοποίηση μετεπιβιβάσεων. Η βασικά διαφορά της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι, σε κάθε επανάληψη, οι γενετικοί τελεστές εφαρμόζονται ταυτόχρονα στις γραμμές και τις συχνότητές τους. Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόστηκε στο δίκτυο της πόλης Tin Shui Wai του Hong Kong.

Οι *Yu et al. (2012)* βασίστηκαν στην έρευνά τους στη Νοημοσύνη Σμήνους (Swarm Intelligence), ενώ χρησιμοποίησαν και τη μέθοδο ACO. Η εφαρμογή αποτελείται από τρία στάδια. Αρχικά κατασκευάζεται ένα νέο δίκτυο στο οποίο προστίθενται οι Γραμμές-Σκελετοί (Skeleton Routes), έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί ο φόρτος των επιβατών που εξυπηρετούνται χωρίς ανάγκη μετεπιβίβασης και να πληρούνται οι επιβαλλόμενοι περιορισμοί. Στη συνέχεια, προστίθενται οι Βασικές Γραμμές (Main Routes) με βάση τη μέγιστη συγκέντρωση επιβατών και, στο τέλος, προστίθενται οι Γραμμές-Διακλαδώσεις (Branch Routes), οι οποίες συνδέουν τις γραμμές-σκελετούς και τις βασικές γραμμές με τον απομακρυσμένο από το κέντρο της πόλης δρόμο. Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε στην πόλη Dalian της Βορειοανατολικής Κίνας.

Οι *Pternea et al. (2015)* δημοσίευσαν μία μέθοδο βιώσιμου σχεδιασμού με τη χρήση Γενετικού Αλγορίθμου (GA), λαμβάνοντας υπόψη το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των οχημάτων και χωροθετώντας ηλεκτρικά οχήματα στο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, θεωρώντας συγκεκριμένο αριθμό και θέσεις στάσεων, δημιουργείται ένα πιθανό δίκτυο από υποψήφιες γραμμές και σε αυτές υπολογίζονται οι συχνότητες και τα απαραίτητα οχήματα. Επιπλέον των συμβατικών στάσεων χρησιμοποιούνται και χωροθετημένοι σε συγκεκριμένες θέσεις τερματικοί σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών λεωφορείων, με τον περιορισμό ότι οι γραμμές που πραγματοποιούνται από ηλεκτρικά οχήματα έχουν σταθμό φόρτισης τουλάχιστον στο ένα άκρο τους. Η συγκεκριμένη έρευνα εφαρμόστηκε στην πόλη του Ηρακλείου Κρήτης.

2.4. Καθορισμός δρομολογίων

Οι *Shafahi and Khani (2010)* υλοποίησαν δύο μεθόδους για τον καθορισμό των δρομολογίων σε υφιστάμενο συγκοινωνιακό δίκτυο, με στόχο την ελαχιστοποίηση των χρόνων αναμονής κατά τις μετεπιβιβάσεις. Το πρώτο είναι Μοντέλο Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού (Mixed Integer Programming Model), από το οποίο προκύπτουν οι χρόνοι αναχώρησης των οχημάτων. Το δεύτερο αποτελεί παραλλαγή του πρώτου, το οποίο εξετάζει ταυτόχρονα τη δυνατότητα παράτασης του χρόνου παραμονής των οχημάτων σε κάποιες στάσεις για τη διευκόλυνση των μετεπιβιβάσεων.

Σε δίκτυα μεγάλων πόλεων, στα οποία η επίλυση με Μικτό Ακέραιο Προγραμματισμό είναι ανέφικτη, χρησιμοποιήθηκε Γενετικός Αλγόριθμος. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία εφαρμόστηκε στο δίκτυο της πόλης Mashhad του Ιράν, στην οποία αποδείχτηκε ότι η χρήση του Γενετικού Αλγορίθμου βελτιώνει σημαντικά τα αποτελέσματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους.

2.5. Συνοπτικοί πίνακες

Στους πίνακες 2.1-2.4 καταγράφονται τα αποτελέσματα των σημαντικότερων και πιο πρόσφατων ερευνών στο πρόβλημα του σχεδιασμού. Πιο συγκεκριμένα, απεικονίζονται τα αποτελέσματα των ερευνών που εφαρμόστηκαν στο πρότυπο ελβετικό δίκτυο του Mandl, το οποίο χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία και διευκολύνει τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Τα στοιχεία που απεικονίζονται είναι τα εξής:

α) d_0: Ποσοστό ζήτησης που ικανοποιείται απευθείας, χωρίς ανάγκη μετεπιβίβασης

β) d_1: Ποσοστό ζήτησης που ικανοποιείται με μία μετεπιβίβαση

γ) d_2: Ποσοστό ζήτησης που ικανοποιείται με δύο μετεπιβιβάσεις

δ) d_{un}: Ποσοστό ζήτησης που δεν ικανοποιείται

ε) ATT: Μέσος χρόνος ταξιδιού ανά επιβάτη

Κάθε πίνακας αφορά σε δίκτυα με συγκεκριμένο αριθμό γραμμών. Με έντονη γραφή (bold) εμφανίζονται οι καλύτερες τιμές κάθε παραμέτρου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εργασία των Nayeem et al. (2014) δε λαμβάνεται υπόψη στη σύγκριση, καθώς δεν περιορίζει τον αριθμό των κόμβων που επιτρέπονται ανά γραμμή.

Πίνακας 2.1: Αποτελέσματα δικτύου Mandl για επίλυση με 4 γραμμές					
	d_0 (%)	d_1 (%)	d_2 (%)	d_{un} (%)	ATT (min)
Mandl (1979)	69.94	29.93	0.13	**0**	12.9
Kidwai (1998)	72.95	26.92	0.13	**0**	12.72
Charkroborty and Dwivedi (2002)	86.86	12.00	1.14	**0**	11.9
Fan and Machemehl (2008)	**93.26**	**6.74**	**0**	**0**	11.37
Nikolic and Teodorovic (2013)	92.1	7.19	0.71	**0**	**10.51**
Nayeem (2014)	96.14	3.47	0.39	0	10.49
Πίνακας 2.2: Αποτελέσματα δικτύου Mandl για επίλυση με 6 γραμμές					
	d_0 (%)	d_1 (%)	d_2 (%)	d_{un} (%)	ATT (min)
Baaj and Mahmassani (1991)	78.61	21.39	**0**	**0**	11.86
Kidwai (1998)	77.92	19.68	2.4	**0**	11.87
Charkroborty and Dwivedi (2002)	86.04	13.96	**0**	**0**	10.3
Fan and Machemehl (2008)	91.52	8.48	**0**	**0**	10.48
Nikolic and Teodorovic (2013)	**95.63**	**4.37**	**0**	**0**	**10.23**
Nayeem (2014)	98.39	1.61	0	0	10.14
Πίνακας 2.3: Αποτελέσματα δικτύου Mandl για επίλυση με 7 γραμμές					
	d_0 (%)	d_1 (%)	d_2 (%)	d_{un} (%)	ATT (min)
Baaj and Mahmassani (1991)	80.99	19.01	**0**	**0**	12.5
Kidwai (1998)	93.91	6.09	**0**	**0**	10.69
Charkroborty and Dwivedi (2002)	89.15	10.85	**0**	**0**	**10.15**
Fan and Machemehl (2008)	93.32	6.36	0.32	**0**	10.42
Nikolic and Teodorovic (2013)	**98.52**	**1.48**	**0**	**0**	**10.15**
Nayeem (2014)	99.17	0.83	0	0	10.07
Πίνακας 2.3: Αποτελέσματα δικτύου Mandl για επίλυση με 8 γραμμές					
	d_0 (%)	d_1 (%)	d_2 (%)	d_{un} (%)	ATT (min)
Baaj and Mahmassani (1991)	79.96	20.04	**0**	**0**	11.86
Kidwai (1998)	84.73	15.27	**0**	**0**	11.22
Charkroborty and Dwivedi (2002)	90.38	9.62	**0**	**0**	10.46
Fan and Machemehl (2008)	94.54	5.46	**0**	**0**	10.36
Nikolic and Teodorovic (2013)	**98.97**	**1.03**	**0**	**0**	**10.09**
Nayeem (2014)	99.86	0.14	0	0	10.03

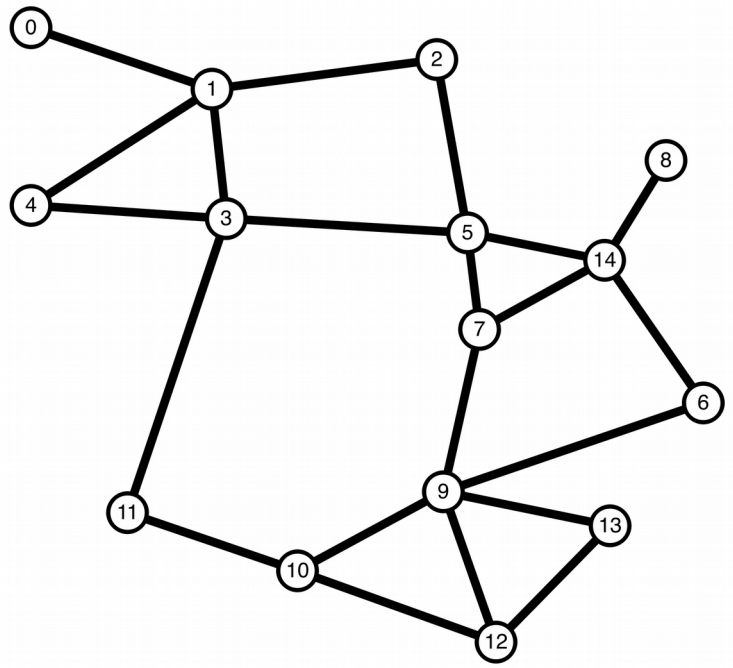
3. Δεδομένα του προβλήματος

3.1. Ανάλυση περιοχής μελέτης – Οδικό Δίκτυο

Για την παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε ως δίκτυο μελέτης το πρότυπο ελβετικό δίκτυο του Mandl, το οποίο χρησιμοποίησε ο ίδιος το 1979 για την επίλυση του προβλήματος σχεδιασμού. Το δίκτυο αυτό αποτελείται από 15 κόμβους και 21 συνδέσμους (Mandl's Swiss Road Network – σχ. 3.1). Χρησιμοποιείται από την πλειοψηφία των ερευνητών και αποτελεί μία πολύ καλή λύση για την διατύπωση του προβλήματος και την εξέταση όλων των πιθανών εναλλακτικών.

Το συγκεκριμένο δίκτυο προσφέρει τα εξής πλεονεκτήματα:

1. Μικρό μέγεθος, άρα ευκολία στη χρήση για την πρώτη εφαρμογή της εναλλακτικής λύσης του προβλήματος,
2. Περιλαμβάνει τις περισσότερες πιθανές ιδιαιτερότητες ενός κανονικού δικτύου, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα καλύτερου ελέγχου της λύσης για τη δημιουργία ευέλικτης λύσης για την πλειοψηφία των πραγματικών δικτύων,
3. Τα απαιτούμενα δεδομένα είναι σταθερά, οπότε δεν υπάρχει δυσκολία εύρεσής τους,
4. Η κοινή χρήση του δικτύου από την πλειοψηφία των ερευνητών παρέχει πολύ καλή δυνατότητα σύγκρισης των μεθόδων και των λύσεων, προκειμένου να εντοπιστεί εύκολα η μέθοδος που δίνει την καλύτερη λύση.



Σχ. 3.1: ΠΡΟΤΥΠΟ ΕΛΒΕΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ MANDL

3.2. Μετακινήσεις – Ζήτηση

Για τις μετακινήσεις τα απαραίτητα δεδομένα είναι οι πίνακες Προέλευσης – Προορισμού, τόσο για τους δέσμιους χρήστες, όσο και για τον συνολικό αριθμό χρηστών του συγκεκριμένου δικτύου. Παρακάτω αναφέρονται αναλυτικά τα δεδομένα της ζήτησης που χρησιμοποιήθηκαν.

3.2.1. Σύνολο μετακινούμενων

Για τη συνολική ζήτηση της περιοχής μελέτης χρησιμοποιήθηκε ο αρχικός πίνακας Προέλευσης – Προορισμού που δόθηκε από τον Mandl (πιν. 3.1) και χρησιμοποιείται από τους ερευνητές ως έχει. Η επιλογή του συγκεκριμένου πίνακα πραγματοποιήθηκε για δύο λόγους:

α) Η διαμόρφωση του προβλήματος επιτρέπει τη σύγκριση των αποτελεσμάτων σε μεγάλο βαθμό σε σχέση με τη βιβλιογραφία. Παρόλο που η μέθοδος επίλυσης είναι διαφορετική, τελικά μπορεί να πραγματοποιηθεί μια ποιοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου με τις υπόλοιπες.

β) Η τάξη μεγέθους των στοιχείων του πίνακα Προέλευσης – Προορισμού ανταποκρίνεται περισσότερο στις συνολικές μετακινήσεις του δικτύου, επομένως η χρήση αυτού του πίνακα για τους δέσμιους χρήστες θα οδηγούσε σε πολύ υψηλές τιμές μετακινήσεων – δυσανάλογες με το μέγεθος του δικτύου – και μεγάλες αποκλίσεις από τις πραγματικές συνθήκες επίλυσης του προβλήματος.

Πίνακας 3.1: Μετακινήσεις για το σύνολο των χρηστών

	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**
0	0	400	200	60	80	150	75	75	30	160	30	25	35	0	0
1	400	0	50	120	20	180	90	90	15	130	20	10	10	5	0
2	200	50	0	40	60	180	90	90	15	45	20	10	10	5	0
3	60	120	40	0	50	100	50	50	15	240	40	25	10	5	0
4	80	20	60	50	0	50	25	25	10	120	20	15	5	0	0
5	150	180	180	100	50	0	100	100	30	880	60	15	15	10	0
6	75	90	90	50	25	100	0	50	15	440	35	10	10	5	0
7	75	90	90	50	25	100	50	0	15	440	35	10	10	5	0
8	30	15	15	15	10	30	15	15	0	140	20	5	0	0	0
9	160	130	45	240	120	880	440	440	140	0	600	250	500	200	0
10	30	20	20	40	20	60	35	35	20	600	0	75	95	15	0
11	25	10	10	25	15	15	10	10	5	250	75	0	70	0	0
12	35	10	10	10	5	15	10	10	0	500	95	70	0	45	0
13	0	5	5	5	0	10	5	5	0	200	15	0	45	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3.2.2. Δέσμιοι χρήστες

Για τη ζήτηση των δέσμιων χρηστών χρησιμοποιήθηκε το γινόμενο του αρχικού πίνακα Προέλευσης – Προορισμού με έναν συντελεστή s. Δεδομένου ότι, στον ανεπτυγμένο κόσμο, οι δέσμιοι χρήστες είναι ένα μικρό υποσύνολο του πληθυσμού, ενώ ταυτόχρονα το ποσοστό αυτό δεν είναι σταθερό σε όλες τις μετακινήσεις λόγω του γεγονότος ότι οι παράγοντες που ορίζουν τους δέσμιους χρήστες σχετίζονται με παραμέτρους εκτός συγκοινωνιακού έργου (οικονομικά και κοινωνικά χαρακτηριστικά), χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής αυτός προκειμένου να δημιουργηθούν τα απαραίτητα δεδομένα χωρίς γνώση των οικονομικών και κοινωνικών χαρακτηριστικών και με γνώμονα την όσο το δυνατόν περισσότερη ανταπόκριση στο φαινόμενο. Με βάση τα παραπάνω στοιχεία, ο συντελεστής s προέκυψε ως $s = p * rand() * D_{ij}$, όπου:

s = συντελεστής προσαρμογής αριθμού δέσμιων χρηστών

p = προκαθορισμένο μέγιστο ποσοστό δέσμιων χρηστών στον πληθυσμό

rand() = συνάρτηση δημιουργίας τυχαίου αριθμού στο διάστημα [0 , 1]

D_{ij} = Αριθμός μετακινήσεων από στάση i προς στάση j

Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέχτηκε μέγιστο ποσοστό δέσμιων χρηστών p = 0.5. Έτσι, με βάση τις παραπάνω παραμέτρους το μέσο ποσοστό μετακινήσεων από δέσμιους χρήστες αποτελεί το 25% των μετακινήσεων, ενώ το εύρος κυμαίνεται από 0% - 50% των συνολικών μετακινήσεων. Επίσης, πρέπει να προστεθεί ότι, εφόσον στον αρχικό πίνακα οι τιμές των μετακινήσεων είναι ίδιες για τα ζεύγη “μετάβασης και επιστροφής” δηλαδή $D_{ij} = D_{ji}$, η ισότητα αυτή διατηρήθηκε και στον νέο πίνακα.

Στον πίνακα 3.2 παρουσιάζονται τα στοιχεία των δέσμιων χρηστών μετά την επεξεργασία με τη χρήση του συντελεστή προσαρμογής s.

Πίνακας 3.2: Μετακινήσεις για τους δέσμιους χρήστες															
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**
0	0	64	67	11	16	38	22	13	12	76	13	6	15	0	0
1	64	0	19	42	8	37	30	8	2	13	0	0	1	0	0
2	67	19	0	1	10	81	39	42	7	8	1	1	1	1	0
3	11	42	1	0	17	23	22	13	1	65	1	4	3	1	0
4	16	8	10	17	0	20	4	3	2	54	6	7	1	0	0
5	38	37	81	23	20	0	42	10	5	425	11	1	0	0	0
6	22	30	39	22	4	42	0	11	7	55	14	3	3	0	0
7	13	8	42	13	3	10	11	0	5	176	13	0	3	1	0
8	12	2	7	1	2	5	7	5	0	18	5	0	0	0	0
9	76	13	8	65	54	425	55	176	18	0	114	68	22	92	0
10	13	0	1	1	6	11	14	13	5	114	0	17	13	4	0
11	6	0	1	4	7	1	3	0	0	68	17	0	29	0	0
12	15	1	1	3	1	0	3	3	0	22	13	29	0	11	0
13	0	0	1	1	0	0	0	1	0	92	4	0	11	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3.3. Παραδοχές

Δεδομένης της στοχαστικότητας του σχεδιασμού, είναι αναγκαίο να οριστούν εξ' αρχής ποιες παράμετροι δε θα εξεταστούν. Αυτό εξυπηρετεί δύο σκοπούς. Αφενός, ο αριθμός των παραμέτρων που επηρεάζουν τον σχεδιασμό είναι θεωρητικά δύσκολο να υπολογιστεί, καθώς μέσα σε αυτές εντάσσονται παράμετροι σχετικές με την ανθρώπινη συμπεριφορά και επιλογή και θα ήταν αδύνατον να ενταχθούν στο σύνολό τους στη μελέτη. Αφετέρου, πολλές από τις παραμέτρους επηρεάζουν ελάχιστα ή καθόλου τον σχεδιασμό, όμως δε μπορεί να εξεταστεί αναλυτικά η συσχέτισή τους με αυτόν έτσι ώστε να φανεί η χρησιμότητά τους.

Για τους παραπάνω λόγους υιοθετείται από τα περισσότερα ερευνητικά προγράμματα η χρήση μαθηματικών μοντέλων. Τα μοντέλα αυτά αποτελούν αφαιρετικές απεικονίσεις της πραγματικότητας, τα οποία την αντικατοπτρίζουν στον τομέα και το βαθμό που επιθυμεί ο ερευνητής προκειμένου να εξετάσει την εργασία του. Αποτελούν τη βάση της μοντελοποίησης της συμπεριφοράς του φαινομένου που εξετάζεται και η βασική τους λειτουργία είναι να προτυποποιήσουν και να δομήσουν τις παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη στον σχεδιασμό και τον βαθμό επιρροής τους σε αυτόν.

Για τη συγκεκριμένη εργασία έγιναν οι παρακάτω παραδοχές:

1. Ο χρόνος διαδρομής για κάθε σύνδεσμο θεωρήθηκε σταθερός και ανεξάρτητος του συγκοινωνιακού και κυκλοφοριακού φόρτου, λόγω έλλειψης δεδομένων και μικρής βαρύτητας στη συγκεκριμένη φάση του σχεδιασμού. Λόγω της ύπαρξης σταθερών χρόνων διαδρομής, δεν υπάρχει ανάγκη συμπερίληψης των ταχυτήτων μελέτης.

2. Ο πίνακας Προέλευσης – Προορισμού περιλαμβάνει ωριαίες μετακινήσεις οι οποίες δε μεταβάλλονται στο χρόνο. Ο σχεδιασμός αφορά στην ωριαία λειτουργία του δικτύου. Πιθανώς ο πίνακας αυτός να περιλαμβάνει τις μετακινήσεις σε ώρα αιχμής, για την οποία πραγματοποιείται ο σχεδιασμός.

3. Στους χρόνους διαδρομής θεωρείται ότι συμπεριλαμβάνεται ο χρόνος στάσης, ο οποίος περιλαμβάνει τους χρόνους επιβράδυνσης και επιτάχυνση για την προσέγγιση και την απομάκρυνση από τη στάση, αντίστοιχα, καθώς και ο χρόνος επιβίβασης και αποβίβασης επιβατών. Σε περίπτωση που συμπεριλαμβάνονταν οι χρόνοι αυτοί θα έπρεπε να αναλυθεί η πολιτική επιβίβασης και αποβίβασης (ταυτόχρονη επιβίβαση και αποβίβαση από το σύνολο των θυρών, περιορισμός επιβίβασης ή αποβίβασης σε κάποια θύρα), ο αριθμός των θυρών του οχήματος, καθώς και ο αριθμός των επιβατών που χρησιμοποιούν τη συγκεκριμένη στάση.

Στα παραπάνω μπορούν να προστεθούν πολύ περισσότερες παραδοχές ελάσσονος σημασίας για την παρούσα φάση, όπως οι καιρικές συνθήκες, οι δυνατότητες των υποδομών των στάσεων και πολλά άλλα. Μελλοντικά μπορούν να αξιοποιηθούν οι παραδοχές αυτές για περαιτέρω έρευνα στο συγκεκριμένο αντικείμενο μέσω της συμπερίληψής τους στο μαθηματικό μοντέλο του σχεδιασμού.

4. Διαμόρφωση μαθηματικού προτύπου επίλυσης

4.1. Γενικά

Η επίλυση του προβλήματος σχεδιασμού δικτύου Αστικών Συγκοινωνιών για τη συγκεκριμένη μέθοδο που αναλύεται στην παρούσα εργασία προσεγγίστηκε με τη μέθοδο του ακέραιου, μη γραμμικού, προγραμματισμού. Ο σκοπός του γραμμικού προγραμματισμού είναι η χρήση μίας ή ενός συστήματος περισσότερων συναρτήσεων με εύρος λύσεων μεγαλύτερο της μίας, προκειμένου να εντοπιστεί η λύση η οποία βελτιστοποιεί την συνάρτηση ή το σύστημα. Τα στοιχεία ενός προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού είναι τα εξής (Πραστάκος, 2006):

α) Αντικειμενική συνάρτηση (Z): Περιλαμβάνει όλες εκείνες τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στο πρόβλημα. Όλες οι εφικτές τιμές της συνάρτησης αυτής αποτελούν το εύρος δυνατών λύσεων. Ανάλογα με τη φύση του προβλήματος, η βέλτιστη λύση της συνάρτησης μπορεί να είναι η ελάχιστη ή η μέγιστη από τις εφικτές τιμές, η οποία προσδιορίζεται με min ή max, αντίστοιχα, πριν τη διατύπωση της συνάρτησης.

β) Περιορισμοί: Περιλαμβάνονται όλες εκείνες οι σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων τις αντικειμενικής συνάρτησης οι οποίες “περιορίζουν” και δημιουργούν τον χώρο εφικτών λύσεων.

Σχετικά με τα προβλήματα ακέραιου προγραμματισμού, η μοναδική διαφορά από τα παραπάνω είναι ότι κάποιες από τις παραμέτρους είναι ακέραιοι αριθμοί. Αυτή η διαφορά μπορεί να φαίνεται αμελητέα, όμως στην πραγματικότητα αυξάνει σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από όσο φαίνεται τη δυσκολία επίλυσης των προβλημάτων αυτών.

Οι μεθοδολογίες επίλυσης ποικίλλουν ανάλογα με τη φύση του προβλήματος και την περιπλοκότητά του. Η πιο σημαντική από τις αρχικές μεθόδους επίλυσης είναι η μέθοδος Simplex. Στη συνέχεια, όμως, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των υπολογιστών και της πληροφορικής, τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού επιλύονται με μεγάλη ευκολία και ταχύτητα με τη χρήση υπολογιστή, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να εκτελεί περίπλοκες πολυεπίπεδες μαθηματικές διαδικασίες με μεγαλύτερη ευκολία και ταχύτητα.

4.2. Διατύπωση του προβλήματος

4.2.1. Αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται ως το σταθμισμένο άθροισμα του χρόνου κάθε επιβάτη στο δίκτυο, του κόστους μετεπιβίβασης και του κόστους για κάθε επιβάτη που δεν εξυπηρετείται από τη συγκεκριμένη λύση. Δεδομένου ότι οι όροι της αντικειμενικής συνάρτησης σχετίζονται με τα κόστη του φορέα και των επιβατών, η βέλτιστη λύση είναι αυτή που την ελαχιστοποιεί. Η διατύπωση της συνάρτησης είναι η εξής:

$$min\,Z = w_1 * TT + w_2 * d_1 + 2 * w_2 * d_2 + 50 * w_2 * d_{un}$$

όπου:

w_1: βάρος συμμετοχής χρόνου

TT: συνολικός χρόνος μετακίνησης επιβατών

w_2: ποινή μετεπιβίβασης

d_1: αριθμός επιβατών που χρειάζεται να πραγματοποιήσουν μία μετεπιβίβαση

d_2: αριθμός που χρειάζεται να πραγματοποιήσουν δύο μετεπιβιβάσεις

d_{un}: αριθμός μη ικανοποιημένων επιβατών (αναγκαίες άνω των δύο μετεπιβιβάσεις)

4.2.2. Περιορισμοί

Οι περιορισμοί, όπως αναφέρθηκε, χρησιμοποιούνται για να περιορίσουν τις υποψήφιες λύσεις σε αυτές που είναι εφικτές, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους σχετικά με το σχεδιασμό και τη λειτουργία του δικτύου. Οι περιορισμοί είναι οι εξής:

α) $s_{min} \leq s_l \leq s_{max}$

β) $l_i \neq l_j \;\forall\; i,j \in L$

γ) $d_0 + d_1 + d_2 + d_{un} = d_{total}$

δ) $c_N = 80$ passengers
$c_A = 150$ passengers

ε) $f_{min,N} \leq f_{l,N} \leq f_{max,N}$
$f_{min,A} < f_{l,A} \leq f_{max,A}$

4.3. Ανάλυση αντικειμενικής συνάρτησης

Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος (βλ. 4.2.1) προέκυψε από τον συμψηφισμό των σημαντικότερων μεγεθών για τον υπολογισμό του κόστους φορέα και επιβατών. Δεδομένου ότι τα μεγέθη που βρίσκονται εντός της συνάρτησης είναι μεγέθη σχετικά με τα κόστη, η βέλτιστη λύση είναι αυτή που ελαχιστοποιεί την τιμή της συνάρτησης αυτής. Τα στοιχεία που παρατίθενται – με τη σειρά που εμφανίστηκαν – είναι τα εξής:

α) Βάρος συμμετοχής χρόνου w_1: Χρησιμοποιείται για την απόδοση βαρύτητας στο μέγεθος του συνολικού χρόνου. Δεδομένου ότι είναι σημαντικό να υπάρχουν μικροί χρόνοι μετακίνησης, έτσι ώστε το δίκτυο να είναι ελκυστικό για τους επιβάτες, επιλέχθηκε στην παρούσα εργασία η απόδοση βάρους ίσου με 2, σε αντίθεση με το σύνηθες βάρος ίσο με 1.

β) Συνολικός χρόνος *TT*: Ορίζεται ως το άθροισμα των χρόνων διαδρομής – συμπεριλαμβανομένου του χρόνου αναμονής σε περίπτωση μετεπιβίβασης – για όλους τους επιβάτες.

γ) Ποινή μετεπιβίβασης w_2: Ορίζεται μια μέση διάρκεια μετεπιβίβασης ίση με 5 λεπτά, η οποία χρησιμοποιείται ως βάρος, προκειμένου το βέλτιστο δίκτυο να ελαχιστοποιεί όσο το δυνατόν περισσότερο τις μετεπιβιβάσεις.

δ) Διάκριση επιβατών με βάση τον αριθμό μετεπιβιβάσεων: Με d_0 ορίζεται ο αριθμός των επιβατών που μπορούν να εξυπηρετηθούν απευθείας από το συγκεκριμένο δίκτυο, με d_1 ο αριθμός των επιβατών που για τη μετακίνησή του χρειάζεται να πραγματοποιήσει μία μετεπιβίβαση, d_2 ο αριθμός των επιβατών που για τη μετακίνησή τους χρειάζεται να πραγματοποιήσουν δύο μετεπιβιβάσεις, d_{un} ο αριθμός των επιβατών που για τη μετακίνησή τους χρειάζεται να πραγματοποιήσουν περισσότερες των δύο μετεπιβιβάσεις και d_{total} ο συνολικός αριθμός επιβατών, δηλαδή το άθροισμα όλων των στοιχείων του πίνακα προέλευσης – προορισμού.

4.4. Ανάλυση περιορισμών

Οι περιορισμοί που χρησιμοποιήθηκαν αναλύονται ως εξής:

α) Περιορισμός μήκους γραμμής: Οι γραμμές των υποψήφιων λύσεων θα πρέπει να βρίσκονται εντός ορίων μήκους, προκειμένου να είναι εφικτή η λειτουργία τους. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε περιορισμός με βάση τον αριθμό των στάσεων, σύμφωνα με τον οποίο σε μια γραμμή l ο αριθμός των στάσεων s_l θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ s_{min} και s_{max}, τα οποία στο συγκεκριμένο πρόβλημα ορίστηκαν ως 4 και 8, αντίστοιχα.

β) Περιορισμός ομοιότητας γραμμών: Σύμφωνα με αυτό τον περιορισμό, κάθε γραμμή l_i στο σύνολο L δε μπορεί να είναι ίδια με κάποια άλλη γραμμή l_j. Ο περιορισμός αυτός χρησιμοποιείται για να μην υπάρχει η δυνατότητα ύπαρξης όμοιων γραμμών, οι οποίες περιορίζουν τις δυνατότητες της υποψήφιας λύσης.

γ) Περιορισμός εξυπηρέτησης επιβατών: Ο συγκεκριμένος περιορισμός χρησιμοποιείται για την εξασφάλιση εξυπηρέτησης όλων των επιβατών από το υποψήφιο δίκτυο, δηλαδή το άθροισμα των μετακινούμενων επιβατών από κάθε κατηγορία να είναι ίσο με τον συνολικό αριθμό των επιβατών στην περιοχή μελέτης, δηλαδή το άθροισμα των στοιχείων του πίνακα προέλευσης – προορισμού.

δ) Ορισμός μεγέθους οχημάτων: Οι τύποι οχήματος που μπορούν να εξυπηρετήσουν το δίκτυο είναι: τυπικό λεωφορείο N μεγέθους c_N = 80 θέσεων και αρθρωτό λεωφορείο A μεγάθους c_A = 150 θέσεων.

ε) Περιορισμός συχνότητας ανά τύπο οχήματος: Ο συγκεκριμένος περιορισμός χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να δοθούν εφικτές συχνότητες διέλευσης οχημάτων σε κάθε γραμμή. Για μία γραμμή l που εξυπηρετείται από τυπικά οχήματα η συχνότητα $f_{l,N}$ πρέπει να βρίσκεται εντός των ορίων $f_{min,N}$ και $f_{max,N}$, δηλαδή 2 και 12 οχήματα ανά ώρα, αντίστοιχα. Για μία γραμμή που εξυπηρετείται από αρθρωτά οχήματα η συχνότητα $f_{l,A}$ πρέπει να βρίσκεται εντός των ορίων $f_{min,A}$ και $f_{max,A}$, δηλαδή 7 και 20 οχήματα ανά ώρα. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα μεγέθη $f_{max,N}$ και $f_{min,A}$ σχετίζονται μεταξύ τους και αποτελούν το όριο επιλογής χρήσης τυπικών ή αρθρωτών λεωφορείων σε κάθε γραμμή, δηλαδή αν η συχνότητα μιας γραμμής με χρήση τυπικών λεωφορείων είναι μεγαλύτερη της $f_{max,N}$, τότε πραγματοποιείται επανυπολογισμός της συχνότητας με τη χρήση αρθρωτών λεωφορείων. Με αυτό τον τρόπο προσδιορίστηκε και η συχνότητα $f_{min,A}$.

4.5 Μορφή αντικειμενικής συνάρτησης

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι η αντικειμενική συνάρτηση είναι γραμμικής μορφής. Αυτό συμβαίνει διότι κάθε όρος της συνάρτησης εκφράζεται με την ίδια μονάδα μέτρησης (λεπτά). Πιο συγκεκριμένα, ο πρώτος όρος w_1*TT έχει μονάδα μέτρησης λεπτά (min) ως άθροισμα των χρόνων διαδρομής όλων των επιβατών επί έναν αδιάστατο αριθμό w_1. Οι υπόλοιποι όροι εκφράζονται με μονάδα μέτρησης αυτή των επιβατών (pas), όμως πολλαπλασιάζοντας αυτές με τους συντελεστές ποινής για μετεπιβίβαση, οι οποίοι εκφράζονται σε λεπτά (min), τότε και το τελικό αποτέλεσμα αυτών εκφράζεται σε λεπτά. Επομένως, η αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται ως άθροισμα αριθμών εκπεφρασμένων σε λεπτά (min), άρα δεν χρειάζεται κανονικοποίηση ούτε λόγω μονάδων μέτρησης, ούτε λόγω ύπαρξης μη κανονικών πράξεων.

4.6. Κατηγοριοποίηση περιορισμών

Οι περιορισμοί της αντικειμενικής συνάρτησης κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες (Hicks et al., 2006), οι οποίες είναι οι εξής:

α) Αυστηροί περιορισμοί (hard constraints): Είναι αυτοί οι οποίοι απαγορεύεται να παραβιαστούν, διότι η υποψήφια λύση που τους υπερβαίνει δεν είναι εφικτή.

β) Εύκαμπτοι περιορισμοί (soft constraints): Είναι αυτοί οι οποίοι όταν παραβιαστούν επιβαρύνουν σε πολύ μεγάλο βαθμό τη λύση, χωρίς όμως να την αποκλείουν από τις υποψήφιες, δεδομένου ότι η εφικτότητά τους παραμένει ενεργή. Τέτοιοι περιορισμοί προσδίδουν ποικιλία στο σύνολο των εφικτών λύσεων και είναι πιθανό μέσα από αυτές να προκύψουν πολύ καλές λύσεις.

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα οι περισσότεροι περιορισμοί είναι αυστηροί λόγω της φύσης του τρόπου επίλυσης. Πιο συγκεκριμένα:

α) Ο περιορισμός ελάχιστου μήκους γραμμής είναι εύκαμπτος, διότι η επίλυση μπορεί να επηρεάσει μια γραμμή και να μειώσει το μήκος της μέχρι ένα όριο μικρότερο του όρου s_{min}, όμως ο περιορισμός μέγιστου μήκους είναι αυστηρός, διότι γραμμές με μεγαλύτερο μήκος του s_{max} δε θεωρούνται εφικτές και αποκλείονται.

β) Ο περιορισμός ομοιότητας γραμμών είναι αυστηρός. Όμως, λόγω της φύσης του, η πιθανότητα να βρεθούν εντελώς όμοιες γραμμές είναι πολύ μικρή, επομένως η ποικιλία παραμένει.

γ) Ο περιορισμός εξυπηρέτησης επιβατών είναι αυστηρός στο σύνολό του, εύκαμπτος όμως για κάθε όρο. Δηλαδή, οι όροι δεν περιορίζονται με κάποιον τρόπο ως προς τις μεταξύ τους τιμές (αν και περιορίζονται έμμεσα λόγω της ποινής κάθε κατηγορίας επιβατών), όμως η μη εξυπηρέτηση έστω και ενός επιβάτη καθιστά τη λύση ανέφικτη διότι, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι πιθανές λύσεις του συγκεκριμένου προβλήματος έχουν ως στόχο να εξυπηρετήσουν το σύνολο των μετακινήσεων, οπότε και ο περιορισμός αυτός αυστηροποιήθηκε κατά την επίλυση. Σε μεγαλύτερα όμως δίκτυα, στα οποία είναι ελάχιστη η πιθανότητα να εξυπηρετηθεί το σύνολο των μετακινήσεων, ο περιορισμός αυτός θα πρέπει να είναι εύκαμπτος, διότι μπορεί να καταστήσει το πρόβλημα σχεδιασμού αδύνατο.

δ) Ο ορισμός μεγέθους οχημάτων είναι αυστηρός και αμετάβλητος, λόγω της σταθερής χωρητικότητας των οχημάτων.

ε) Οι περιορισμοί συχνότητας διέλευσης είναι αυστηροί κατά τη μετάβαση σε διαφορετικό τύπο οχήματος, δηλαδή οι περιορισμοί $f_{min,N}$ και $f_{max,A}$, ενώ οι περιορισμοί $f_{max,N}$ και $f_{min,A}$ είναι εύκαμπτοι. Κανονικά θα έπρεπε οι περιορισμοί συχνότητας διέλευσης να είναι διαφορετικοί, δηλαδή εύκαμπτοι για την εναλλαγή τύπου οχήματος και με χρήση περισσότερων τύπων και αυστηροί για μη εφικτές και μη λειτουργικές συχνότητες, όπως άνω των 20 ή 30 οχημάτων ανά ώρα, όμως για το παρόν πρόβλημα κρίνονται επαρκείς.

4.7. Εφαρμοζόμενες ποινές

Για την επιβολή των περιορισμών κατά την επίλυση του προβλήματος δίνονται ποινές σε περίπτωση υπέρβασής τους. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα οι ποινές είναι δύο τύπων:

α) Αριθμητικές ποινές: Χρησιμοποιούνται και στα δύο είδη περιορισμών και ορίζονται ως τιμές που προστίθενται ή πολλαπλασιάζονται με τον όρο που υπερβαίνει τον περιορισμό, έτσι ώστε να αυξήσουν την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Για τους εύκαμπτους περιορισμούς πρόκειται για έναν ορισμένο από τον χρήστη αριθμό, ενώ για τους αυστηρούς περιορισμούς προβλέπεται πολλαπλασιασμός του όρου με το $+\infty$, έτσι ώστε η αντικειμενική συνάρτηση να απειριστεί και η λύση αυτή να θεωρηθεί ανέφικτη.

β) Λογικές ποινές: Χρησιμοποιούνται στους αυστηρούς περιορισμούς και ορίζονται ως “λογικές πύλες” σύμφωνα με τις οποίες αν μια λύση ή τμήμα της κατά τα στάδια επίλυσης υπερβαίνει τους περιορισμούς αυτούς τότε δεν συμπεριλαμβάνεται στις πιθανές λύσεις ή το τμήμα της δεν ενσωματώνεται στη λύση στην οποία τροποποιήθηκε.

Αριθμητικές ποινές χρησιμοποιήθηκαν στους περιορισμούς d_1, d_2, d_{un} (γ) (με τη χρήση της ποινής μετεπιβίβασης) και στο σύνολο του περιορισμού γ με απειρισμό της αντικειμενικής συνάρτησης για μη εξυπηρετούμενες μετακινήσεις. Λογικές ποινές εφαρμόστηκαν στους περιορισμούς s_{max} (α), β και $f_{max,N}$, $f_{min,A}$ (ε). Στους υπόλοιπους περιορισμούς που δεν δόθηκαν ποινές παρατηρήθηκε ότι οι λύσεις περιορίζονται από τη φύση τους σε αυτούς, οπότε δεν ήταν αναγκαία η χρήση ποινής για την οριοθέτησή τους.

5. Μεθοδολογία επίλυσης

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται οι μέθοδοι και τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του προβλήματος σχεδιασμού δικτύων, καθώς και ο αλγόριθμος που δημιουργήθηκε και χρησιμοποιήθηκε για αυτήν. Αρχικά θα αναφερθεί το περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιήθηκε η επίλυση, ενώ στη συνέχεια θα αναλυθεί η διαδικασία που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε.

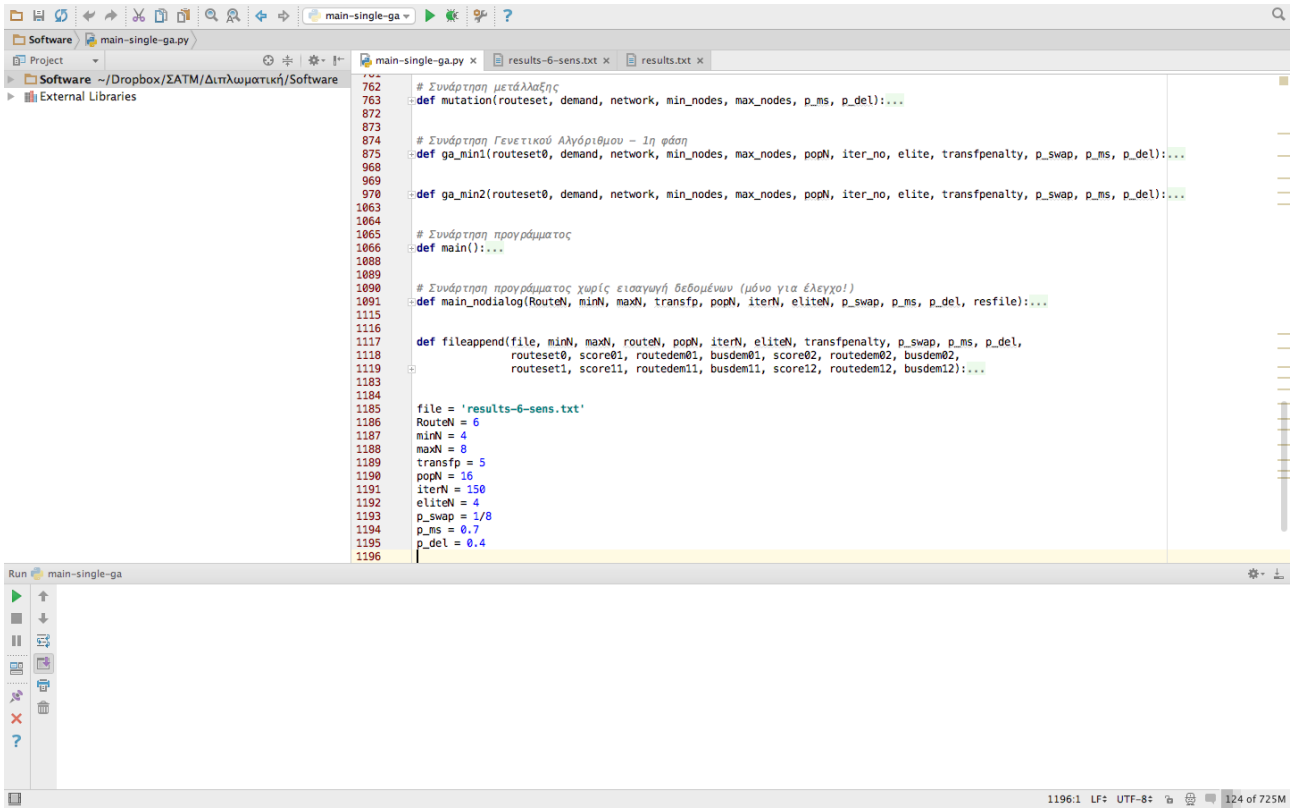
5.1. Περιβάλλον επίλυσης

Ο αλγόριθμος της επίλυσης του προβλήματος που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία δημιουργήθηκε στο μεγαλύτερο μέρος του από την αρχή. Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση είναι η Python 3.5, ενώ το προγραμματιστικό περιβάλλον (IDE) εφαρμογής είναι το PyCharm 2016.1 Community Edition.

Η γλώσσα Python επιλέχθηκε διότι είναι μια πολύ απλή και κατανοητή γλώσσα, ενώ ταυτόχρονα πολύ χρήσιμη, δυνατή και γρήγορη. Είναι μια αντικειμενοστρεφής γλώσσα ανοιχτού κώδικα η οποία χρησιμοποιείται από μεγάλη ομάδα προγραμματιστών. Η δύναμη της Python έγκειται στο γεγονός ότι μπορεί να διαχειριστεί με ευκολία και ευελιξία μεγάλους όγκους δεδομένων, γι' αυτό και χρησιμοποιείται πολύ συχνά σε λογισμικά που έχουν άμεση σχέση με διαχείριση βάσεων δεδομένων. Το πλεονέκτημα αυτό, σε συνδυασμό με την απλότητα της γλώσσας αυτής οδήγησαν στην επιλογή της για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος.

Η έκδοση 3.5 της Python, και γενικότερα η Python 3, αποτελεί εξέλιξη της Python 2 και εισήγαγε πολλές νέες καινοτομίες για την αποτελεσματικότερη χρήση της γλώσσας. Δεδομένου ότι η έκδοση 3 αποτελεί την μελλοντική βάση στον προγραμματισμό με Python, θεωρήθηκε σημαντικό η σύνταξη του κώδικα να πραγματοποιηθεί με χρήση της συγκεκριμένης γλώσσας.

Το λογισμικό PyCharm αποτελεί ένα από τα καλύτερα IDEs για τον προγραμματισμό σε Python. Το περιβάλλον του είναι εύχρηστο και κατανοητό χωρίς να περιορίζεται σε δυνατότητες, τόσο coding όσο και debugging. Στην εικόνα 5.1 φαίνεται ένα τυπικό παράθυρο του συγκεκριμένου λογισμικού.



Εικ. 5.1. Ένα τυπικό παράθυρο του λογισμικού PyCharm 2016.1 CE

5.2. Τεχνικές επίλυσης

5.2.1. Γενικά

Η επίλυση του προβλήματος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου, όπως συνηθίζεται στις αντίστοιχες έρευνες τα τελευταία χρόνια. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (GA), ή αλλιώς Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms) ή Εξελικτικά Προγράμματα (Evolutionary Programs), είναι μορφές ευρετικών μεθόδων επίλυσης προβλημάτων που επινοήθηκαν στη δεκαετία του 1960 και σχετίζονται με τη θεωρία του εξελικτικού προγραμματισμού (Evolutionary Programming). Η λογική του γενετικού αλγορίθμου βασίζεται στη θεωρία της εξέλιξης (Evolution) του Δαρβίνου, σύμφωνα με την οποία, μέσω των διαδικασιών της “φυσικής επιλογής” (natural selection) και της χρήσης των “γενετικών τελεστών” (genetic operators), πραγματοποιείται σταδιακή εξέλιξη ενός αρχικού πληθυσμού σε έναν νέο.

5.2.2. Ιστορική αναδρομή γενετικών αλγορίθμων

Η αρχική ιδέα της μελέτης των εξελικτικών συστημάτων είχε ήδη ξεκινήσει από τη δεκαετία του 1950 (Mitchell, 1998). Τότε είχε διαδοθεί η ιδέα ότι η μελέτη της εξέλιξης των οργανισμών μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στην ανάπτυξη εργαλείων για την επίλυση προβλημάτων. Μια πρώτη προσέγγιση της μεθόδου αυτής παρουσιάστηκε από τον Rechenberg στη δεκαετία του 1960 με τις “εξελικτικές στρατηγικές” (evolutionsstrategie, 1965, 1973) και εξελίχθηκε περαιτέρω από τον Schwefel (1975, 1977). Οι εξελικτικές στρατηγικές και οι γενετικοί αλγόριθμοι συνέχισαν να αναπτύσσονται παράλληλα και ανεξάρτητα μέχρι και τη δεκαετία του 1990, στην οποία για πρώτη φορά άρχισε η αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο αυτών πεδίων έρευνας.

Το 1966 ο Fogel ανέπτυξε τον “Εξελικτικό Προγραμματισμό”, ο οποίος αναπαριστά τη λύση ενός προβλήματος με τρόπο που εξαρτάται από το ίδιο το πρόβλημα. Παραδείγματος χάριν, σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πραγματικών αριθμών τα μέλη του πληθυσμού αναπαρίστανται ως διανύσματα πραγματικών αριθμών. Αντίστοιχα, για το πρόβλημα του περιοδεύοντος πωλητή (travelling salesperson problem, Černa et al., 2011, Κεφ. 2.1.1.β), χρησιμοποιούνται διατεταγμένες λίστες, ενώ για εφαρμογές μηχανών πεπερασμένων καταστάσεων χρησιμοποιούνται γράφοι. Παρόλα αυτά, η κοινότητα της Τεχνητής Νοημοσύνης (artificial intelligence) απέρριψε τις τεχνικές τους.

Την ίδια περίοδο χαρακτηριστικό παράδειγμα επιπλέον έρευνας στον τομέα του εξελικτικού προγραμματισμού αποτελεί η Εξελικτική Εφαρμογή του Box (1957), η οποία όμως έμοιαζε περισσότερο με κάποιου είδους τεχνική διοίκησης, παρά με εξελικτικό αλγόριθμο. Ωστόσο, η εξελικτική εφαρμογή αποτέλεσε πρόγονο αρκετών τεχνικών τοπικής αναζήτησης που αναπτύχθηκαν αργότερα. Άλλες έρευνες, όπως αυτές των Bledsoe (1961) και Bremermann (1962), ήταν πιο συναφείς με την τότε αντίληψη σχετικά με τους εξελικτικούς αλγορίθμους.

Παράλληλα, η χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών στον κλάδο της εξελικτικής βιολογίας διαδόθηκε, με τους Baricelli (1957, 1962), Fraser (1957) και Martin and Cockerham (1960) να αξιοποιούν τις δυνατότητες των ηλεκτρονικών υπολογιστών για την πραγματοποίηση ελεγχόμενων πειραμάτων στα οποία προσομοιωνόταν η εξέλιξη των φυσικών οργανισμών.

Τελικά, ο πρώτος Γενετικός Αλγόριθμος εφευρέθηκε από τον Αμερικανό καθηγητή ψυχολογίας, ηλεκτρολόγο μηχανικό και επιστήμονα πληροφορικής John Henry Holland κατά τη δεκαετία του 1960 στο Πανεπιστήμιο του Michigan. Ο Holland κατασκεύασε τον συγκεκριμένο αλγόριθμο για τη συστηματική μελέτη της διαδικασίας της φυσικής προσαρμογής και τη σχεδίαση λογισμικού τεχνητών στστημάτων, το οποίο διατηρεί τους

σημαντικότερους μηχανισμούς των φυσικών συστημάτων. Παρουσιάστηκε το 1975 στο βιβλίο του “Adaptation in Natural and Artificial Systems” ως απλοποιημένη εκδοχή της βιολογικής εξέλιξης και περιέγραψε το θεωρητικό υπόβαθρο της χρήσης του. Πιο συγκεκριμένα, η προσαρμογή πραγματοποιείται με τη μετάβαση ενός αρχικού πληθυσμού χρωμοσωμάτων (συμβολοσειρές από “bits” 0 και 1) σε έναν νέο με τη χρήση της τεχνικής της “φυσικής επιλογής” σε συνδυασμό με τους γενετικούς τελεστές της διασταύρωσης (crossover), της μετάλλαξης (mutation) και της αντιστροφής (inversion). Το κάθε χρωμόσωμα αποτελείται από γονίδια (genes), το καθένα από τα οποία καθορίζει ένα χαρακτηριστικό του ατόμου. Ο τελεστής της επιλογής διαλέγει τα χρωμοσώματα του πληθυσμού τα οποία θα διασταυρωθούν, με τα πιο “κατάλληλα” χρωμοσώματα να παράγουν περισσότερους απογόνους σε σχέση με τα υπόλοιπα. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται ο τελεστής διασταύρωσης, ο οποίος ανταλλάσσει τμήματα μεταξύ δύο χρωμοσωμάτων με τον ίδιο τρόπο που στη φύση διασταυρώνονται δύο απλοειδείς οργανισμοί. Έπειτα, ο τελεστής της μετάλλαξης αλλάζει τυχαία την τιμή κάποιων γονιδίων και ο τελεστής της αντιστροφής αντιμεταθέτει τη σειρά εμφάνισης των γονιδίων σε ένα τμήμα του χρωμοσώματος.

Ο Γενετικός Αλγόριθμος του Holland αποτέλεσε καινοτομία στο χώρο της Τεχνητής Νοημοσύνης σε σύγκριση με παλαιότερες έρευνες στον τομέα των εξελικτικών στρατηγικών. Πιο συγκεκριμένα, ο Rechenberg είχε χρησιμοποιήσει αλγόριθμο στον οποίο η αρχική λύση περιελάμβανε μόνο δύο άτομα, έναν γονέα και έναν απόγονο, εκ των οποίων ο απόγονος προέκυπτε μέσω μετάλλαξης του γονέα. Αντίστοιχα, ο Fogel εξασφάλιζε την ποικιλομορφία του πληθυσμού χρησιμοποιώντας αποκλειστικά τον τελεστή της μετάλλαξης. Η μέθοδος του Holland αξιοποίησε περισσότερους γενετικούς τελεστές και η αρχική λύση περιελάμβανε ολόκληρο πληθυσμό και όχι ένα ή δύο άτομα. Για το λόγο αυτό ήταν ο πρώτος που θεμελίωσε θεωρητικά την υπολογιστική εξέλιξη.

Από τη δεκαετία του 1990, με την αλληλεπίδραση μεταξύ Γενετικών Αλγορίθμων, Εξελικτικών Στρατηγικών και Εξελικτικού Προγραμματισμού, τα όριά τους είναι λιγότερο ευδιάκριτα. Σήμερα, ο όρος “Γενετικός Αλγόριθμος” έχει ευρύτερη έννοια από αυτή που είχε όταν πρωτοεμφανίστηκε από τον Holland.

5.2.3. Διαδικασία εκτέλεσης γενετικού αλγορίθμου

Η ορολογία που χρησιμοποιείται στους γενετικούς αλγορίθμους είναι δανεισμένη από το χώρο της Φυσικής Γενετικής (Γεωργόπουλος και Λυκοθανάσης, 1999). Με κάθε επανάληψη του αλγορίθμου δημιουργείται μία νέα γενιά (generation). Το σύνολο των υποψήφιων λύσεων σε κάθε γενιά ονομάζεται πληθυσμός (population) και κάθε υποψήφια λύση που βρίσκεται στον πληθυσμό ονομάζεται άτομο (individual) ή γενότυπος (genotype). Κάθε άτομο αποτελείται από ένα σύνολο χρωμοσωμάτων (chromosomes), συνηθίζεται όμως κάθε άτομο να αποτελείται από ένα χρωμόσωμα, με αποτέλεσμα τα άτομα και τα χρωμοσώματα να ταυτίζονται). Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από γραμμικά διατεταγμένα γονίδια (genes). Τα γονίδια που επηρεάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του ατόμου βρίσκονται σε συγκεκριμένες θέσεις, οι οποίες αποκαλούνται loci. Οι διαφορετικές καταστάσεις των γονιδίων ονομάζονται alleles (τιμές χαρακτηριστικού γνωρίσματος). Η έκφραση του κάθε χρωμοσώματος, δηλαδή η “αποκωδικοποιημένη” μορφή του, ονομάζεται φαινότυπος (phenotype). Παραδείγματος χάριν, στη συγκεκριμένη εργασία κάθε χρωμόσωμα αποτελεί το σύνολο των γραμμών ενός συγκοινωνιακού δικτύου.

Ένα από τα πλεονεκτήματα του γενετικού αλγορίθμου, το οποίο περιγράφεται αναλυτικά στη συνέχεια, είναι η ταυτόχρονη αναζήτηση σε πολλές κατευθύνσεις και η αξιοποίηση της παραγόμενης πληροφορίας. Σε κάθε γενιά, οι “καλές” λύσεις παραμένουν και αναπαράγονται, ενώ οι “κακές” λύσεις απομακρύνονται. Η καταλληλότητα μιας λύσης εκφράζεται από την τιμή φυσικής κατάστασης (fitness), δηλαδή την τιμή την οποία λαμβάνει η αντικειμενική συνάρτηση.

Τα βήματα, συνοπτικά, που ακολουθούνται κατά τη διαδικασία εφαρμογής του γενετικού αλγορίθμου είναι τα εξής:

α) Αρχικοποίηση πληθυσμού (Initialization)

β) Αξιολόγηση κάθε λύσης

γ) Επιλογή νέου πληθυσμού

δ) Εφαρμογή γενετικών τελεστών διασταύρωσης και μετάλλαξης

ε) Επιστροφή στο βήμα (β)

στ) Τερματισμός Γενετικού Αλγορίθμου

Πιο αναλυτικά:

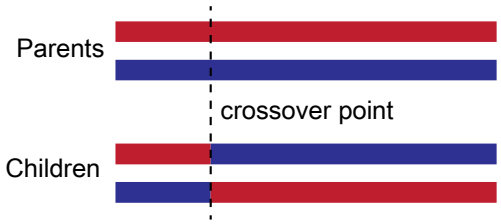
α) Αρχικοποίηση πληθυσμού (Initialization): Δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού λύσεων, το μέγεθος του οποίου παραμένει σταθερό σε όλη τη διαδικασία επίλυσης.

β) Αξιολόγηση κάθε λύσης: Υπολογισμός της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε λύση. Σε περίπτωση προβλήματος ελαχιστοποίησης, οι καλύτερες λύσεις είναι αυτές με την μικρότερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, ενώ σε περίπτωση προβλήματος μεγιστοποίησης οι καλύτερες λύσεις είναι αυτές με την μεγαλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

γ) Επιλογή νέου πληθυσμού: Επιλογή των ατόμων που θα επιβιώσουν μέχρι την επόμενη γενιά με τη χρήση “επιλογής ρουλέτας με σχισμές” (slotted roulette wheel selection). Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, κάθε άτομο τοποθετείται στη ρουλέτα και καταλαμβάνει χώρο ανάλογο με την απόδοσή του, έτσι ώστε επίσης ανάλογη να είναι και η πιθανότητα επιλογής του. Επιπλέον, συνήθως εφαρμόζεται και η μέθοδος του ελιτισμού (elitism), σύμφωνα με την οποία ένας προκαθορισμένος αριθμός των καλύτερων λύσεων σε κάθε γενιά μεταφέρεται αυτούσιος στην επόμενη.

δ) Εφαρμογή γενετικών τελεστών διασταύρωσης και μετάλλαξης:

Με την εφαρμογή αρχικά της διασταύρωσης (crossover), κάθε άτομο έχει δεδομένη πιθανότητα p_c να επιλεγεί. Στο καθένα αντιστοιχίζεται ένας τυχαίος πραγματικός αριθμός r στο διάστημα [0 , 1]. Αν σε κάποιο άτομο ισχύει ότι $r < p_c$, τότε επιλέγεται για διασταύ-ρωση. Ο αναμενόμενος αριθμός διασταυρούμενων μελών ορίζεται ως $p_c * N$, όπου N το μέγεθος του πληθυμού. Τα μέλη που επιλέχθηκαν για διασταύρωση τοποθετούνται σε ζεύγη και σε κάθε ζεύγος αντιστοιχίζεται ένας τυχαίος ακέραιος αριθμός από το διάστημα [1 , m-1], όπου m το μήκος του χρωμοσώματος, δηλαδή το πλήθος των γονιδίων. Ο αριθμός αυτός καθορίζει το “σημείο διασταύρωσης” (crossover point), δηλαδή το σημείο στο οποίο το αρχικό χρωμόσωμα διασπάται σε επιμέρους τμήματα. Έτσι, δημιουργούνται δύο νέα άτομα (χρωμοσώματα) με εναλλαγή των τμημάτων του καθενός (Σχ. 5.1).



Σχ. 5.1. Διασταύρωση
(πηγή: wikipedia.org)

Αρκετοί γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν μια παραλλαγή του τελεστή διασταύρωσης, αυτή της ομοιόμορφης διασταύρωσης (uniform crossover). Η

διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι κάθε γονέας, αντί να χωρίζεται σε δύο διακριτά μέρη, κληροδοτεί σε κάθε απόγονο ένα ορισμένο ποσοστό των γονιδίων του, τα οποία βρίσκονται σε διάφορες θέσεις στο χρωμόσωμα και όχι απαραίτητα διαδοχικές (Σχ. 5.2).

Στα άτομα που προκύπτουν από τη διασταύρωση εφαρμόζεται ο τελεστής της μετάλλαξης (mutation), σύμφωνα με τον οποίο επιλέγονται και μεταβάλλονται με τυχαίο τρόπο ορισμένα γονίδια των ατόμων του πληθυσμού.

Σχ. 5.2. Ομοιόμορφη διασταύρωση (πηγή: wikipedia.org)

ε) Επιστροφή στο βήμα (β): Αξιολόγηση των ατόμων που αποτελούν τη νέα γενιά, σύμφωνα με τη διαδικασία που πραγματοποιείται στο βήμα (β).

στ) Τερματισμός γενετικού αλγορίθμου: Πραγματοποίηση τερματισμού της διαδικασίας όταν καταστεί αληθής η συνθήκη τερματισμού. Τέτοιες συνθήκες είναι οι εξής (Sivanandam and Deepa, 2008):

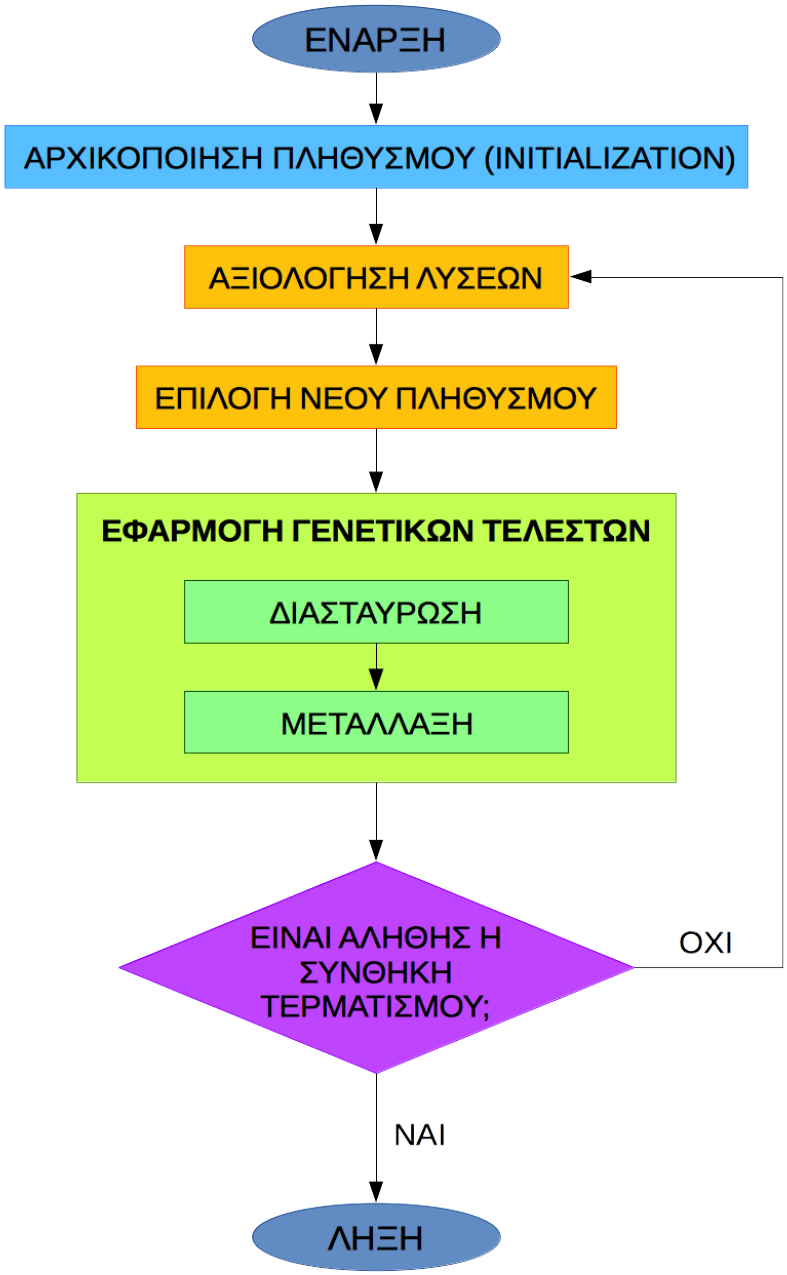
- Πλήθος επαναλήψεων: Τερματισμός του αλγορίθμου μετά από πραγματοποίηση δεδομένου αριθμού επαναλήψεων, άρα με την πάροδο αντίστοιχου αριθμού γενεών.
- Συμπλήρωση δεδομένου χρονικού διαστήματος εκτέλεσης του αλγορίθμου.
- Απουσία περαιτέρω βελτίωσης των παραγόμενων λύσεων για δεδομένο αριθμό γενεών (stall generations) ή με την πάροδο καθορισμένου χρόνου (stall time limit).

Ακόμα, από τους Sivanandam and Deepa αναφέρονται εναλλακτικές τεχνικές τερματισμού:

- Τεχνική του “καλύτερου ατόμου” (Best Individual): Η αναζήτηση σταματή όταν η ελάχιστη τιμή καταλληλότητας στον πληθυσμό καταστεί καλύτερη της τιμής σύγκλισης (convergence value).
- Τεχνική του “χειρότερου ατόμου” (Worst Individual): Η αναζήτηση σταματά όταν η τιμή του λιγότερο κατάλληλου ατόμου του πληθυσμού είναι καλύτερη από την τιμή σύγκλισης.

- Τεχνική του “αθροίσματος καταλληλότητας” (Sum of Fitness): Η αναζήτηση σταματά όταν το άθροισμα των τιμών των συναρτήσεων είναι καλύτερο από την τιμή σύγκλισης.
- Τεχνική της “διαμέσου καταλληλότητας” (Median Fitness): Η αναζήτηση σταματά όταν τουλάχιστον τα μισά άτομα του πληθυσμού έχουν τιμή καταλληλότητας καλύτερη από την τιμή σύγκλισης.

Στο Σχ. 5.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής για τη διαδικασία επίλυσης ενός προβλήματος με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου.



Σχ. 5.3. Διάγραμμα ροής τυπικού Γενετικού Αλγορίθμου

5.2.4. Πλεονεκτήματα χρήσης γενετικού αλγορίθμου

Σύμφωνα με τους Γεωργόπουλο και Λυκοθανάση (1999) και Μακρόπουλο και Ευστρατιάδη (2011) τα βασικότερα πλεονεκτήματα των Γενετικών Αλγορίθμων συνοψίζονται ως εξής:

α) Υψηλή αποδοτικότητα: Οι Γενετικοί αλγόριθμοι έχουν τη δυνατότητα να επιλύουν γρήγορα και αξιόπιστα περίπλοκα προβλήματα πολλών μεταβλητών και να εντοπίζουν το ακρότατο μιας συνάρτησης σε μικρό σχετικά αριθμό δοκιμών. Ταυτόχρονα, είναι ιδανικοί για την επίλυση προβλημάτων με συναρτήσεις που παρουσιάζουν έντονη διακύμανση, τα οποία υπό άλλες συνθήκες θα ήταν πολύ δύσκολο να επιλυθούν με παραδοσιακές μεθόδους. Πρακτικά, εξέταση 10 ατόμων από γενετικό αλγόριθμο ισοδυναμεί με εξέταση 1000 ατόμων από κάποια παραδοσιακή μέθοδο. Ένα βασικό χαρακτηριστικό των γενετικών αλγορίθμων είναι ο συνδυασμός της εξερεύνησης του χώρου αναζήτησης με την εκμετάλλευση των παραγόμενων πληροφοριών, ενώ οι παραδοσιακές μέθοδοι διέθεταν ένα μόνο από τα δύο χαρακτηριστικά, όπως ο “αλγόριθμος του ορειβάτη” (Hill-Climbing Algorithm), ο οποίος εκμεταλλεύεται σε μεγάλο βαθμό την παραγόμενη πληροφορία αλλά δεν αξιοποιεί τον διαθέσιμο χώρο αναζήτησης, και ο αλγόριθμος της “τυχαίας αναζήτησης” (Random Search), ο οποίος εξερευνά ικανοποιητικά το διαθέσιμο χώρο, αγνοώντας όμως πλήρως τις παραγόμενες πληροφορίες. Τέλος, η δυνατότητα παράλληλης υλοποίησης, άρα και εκμετάλλευσης των πλεονεκτημάτων που παρέχουν οι παράλληλες μηχανές, ευνοούν την αποδοτικότητα των αλγορίθμων αυτών.

β) Εύκολος συνδυασμός με υφιστάμενα πρότυπα και συστήματα: Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην επίλυση προβλημάτων χωρίς να απαιτούνται τροποποιήσεις στην αντικειμενική συνάρτηση, λόγω του γεγονότος ότι χρησιμοποιούνται μόνο οι πληροφορίες που αφορούν στη συνάρτηση που πρόκειται να βελτιστοποιηθεί.

γ) Ευρύ πεδίο εφαρμογής: Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι, επειδή συνδυάζονται εύκολα με πρακτικά οποιαδήποτε πρότυπα, καθίστανται κατάλληλοι για χρήση σε ποικίλους επιστημονικούς τομείς, όπως αυτούς των μαθηματικών, των οικονομικών και των μηχανικών.

δ) Επεκτασιμότητα και εξελιξιμότητα: Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζονται στις ιδιαιτερότητες του κάθε προβλήματος και να τροποποιηθούν για υψηλότερη απόδοση κατά την κρίση του σχεδιαστή του.

ε) Ευελιξία στον συνδυασμό με άλλες μεθόδους: Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι μπορούν πολύ εύκολα να “υβριδοποιηθούν”, μέσω συνδυασμών με άλλες μεθόδους, εφόσον απαιτείται για την εύρεση βέλτιστης λύσης.

στ) Ανεξαρτησία από ιδιότητες αντικειμενικής συνάρτησης: Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι είναι ανεξάρτητοι από τις ιδιότητες της αντικειμενικής συνάρτησης, σε αντίθεση με τις

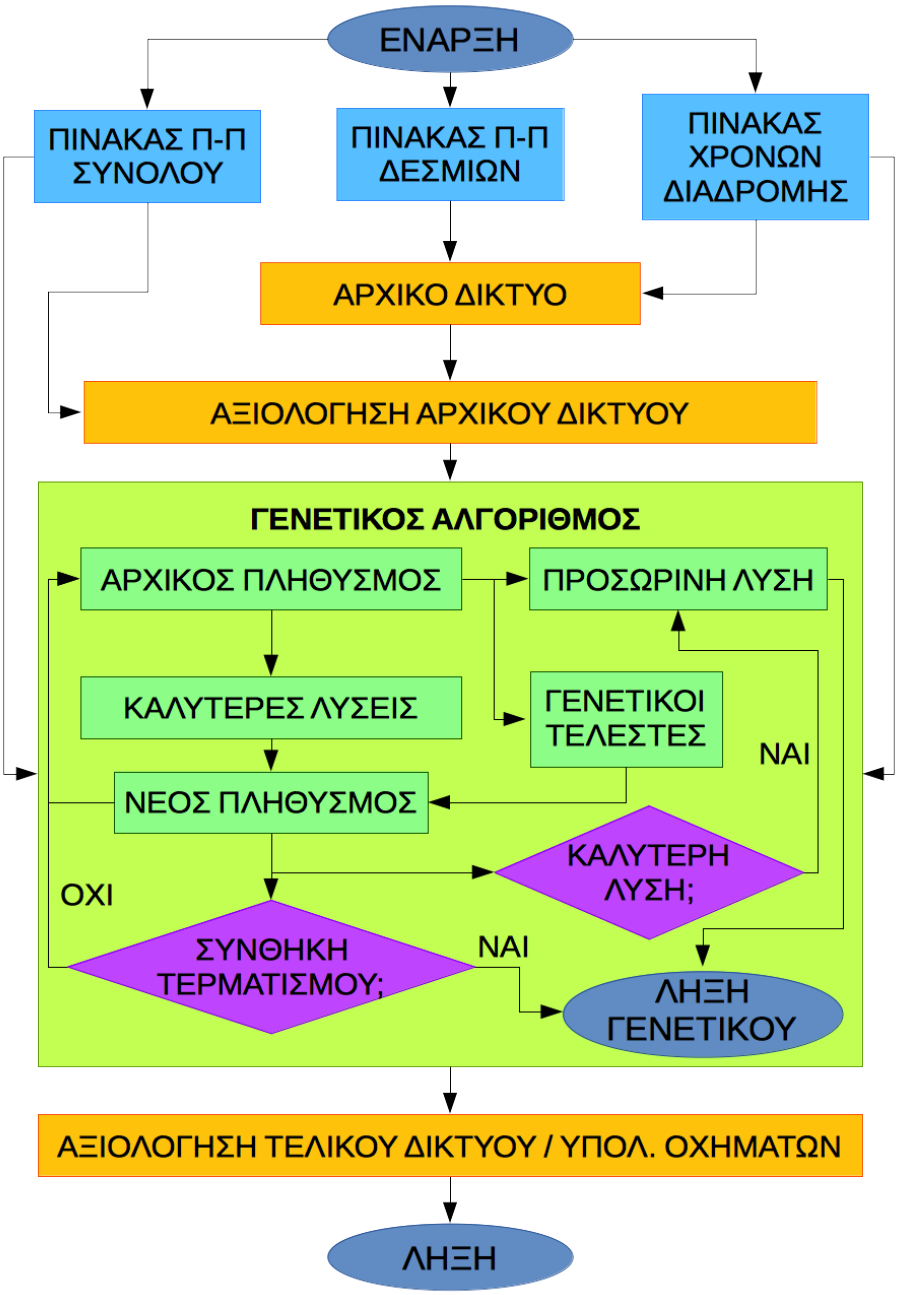
παραδοσιακές μεθόδους, οι οποίες απαιτούν πολύ συχνά την ύπαρξη δεδομένων ιδιοτήτων στην αντικειμενική συνάρτηση, όπως η συνέχεια και η παραγωγισιμότητα.

5.3. Παρουσίαση της δομής του προγράμματος επίλυσης

5.3.1. Γενικά

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, για την επίλυση του προβλήματος στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε πρόγραμμα επίλυσης με τη χρήση της γλώσσας Python 3. Η δομή του προγράμματος βασίζεται στη λογική επίλυσης με χρήση γενετικού αλγορίθμου. Πιο συγκεκριμένα, η προσέγγιση της παρούσας εργασίας βασίστηκε στη μέθοδο που παρουσίασε ο Nayeem (2014) με κάποιες τροποποιήσεις, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν λόγω έλλειψης πρόσβασης στον βασικό κώδικα που ανέπτυξε ο Nayeem, καθώς και λόγω της διαφοροποίησης του παρόντος προβλήματος από τα υπόλοιπα.

Στο Σχ. 5.4 φαίνεται το διάγραμμα ροής του συγκεκριμένου προγράμματος. Αναλυτική παρουσίαση των βημάτων πραγματοποιείται παρακάτω.



Σχ. 5.4. Διάγραμμα ροής του προγράμματος επίλυσης

5.3.2. Αναλυτική παρουσίαση των βημάτων επίλυσης

Το πρόγραμμα επίλυσης του προβλήματος σχεδιασμού δικτύου αστικών συγκοινωνιών που παρουσιάζεται στη συγκεκριμένη εργασία αποτελείται από πέντε βήματα, τα οποία αναλύονται ως εξής:

α) Εισαγωγή των δεδομένων:

Αρχικά εισάγονται στο πρόγραμμα τα απαραίτητα δεδομένα για την επίλυση του προβλήματος, τα οποία είναι οι πίνακες Προέλευσης – Προορισμού για τους δέσμιους επιβάτες και το σύνολο των επιβατών, καθώς και η μορφή του δικτύου στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η επίλυση.

Οι δύο πίνακες Προέλευσης – Προορισμού εισάγονται από αρχείο csv (comma separated value), στο οποίο οι μετακινήσεις βρίσκονται σε πίνακα μορφής NxN, όπου N ο αριθμός των κόμβων (στάσεων) του δικτύου. Ο αλγόριθμος αυτού του σταδίου διαβάζει το αρχείο csv, δημιουργεί ένα αντίστοιχο γραμμικής μορφής, στην οποία κάθε γραμμή αποτελείται από τρεις όρους: κόμβος προέλευσης, κόμβος προορισμού, μετακινήσεις από τον κόμβο προέλευσης στον κόμβο προορισμού. Ταυτόχρονα, ο ίδιος πίνακας γραμμικής μορφής καταγράφεται στη μνήμη του προγράμματος για χρήση στη συνέχεια.

Το δίκτυο εισάγεται από αρχείο csv μορφής NxN, όπου N ο αριθμός των κόμβων του δικτύου, όπως και οι πίνακες Προέλευσης – Προορισμού. Στον συγκεκριμένο πίνακα η διαφοροποίηση από τους προηγούμενους έγκειται στο γεγονός ότι οι γειτονικοί μεταξύ τους κόμβοι λαμβάνουν ως τιμή την μέση διάρκεια μετακίνησης (σε λεπτά) από τον έναν κόμβο στον άλλο, ενώ στην περίπτωση μη γειτονικών κόμβων η τιμή αυτή ορίζεται ίση με μηδέν, έτσι ώστε να αναγνωρίζει ο αλγόριθμος ποιοι κόμβοι είναι γειτονικοί και να δημιουργήσει το δίκτυο. Τα δεδομένα του δικτύου αποθηκεύονται στη μνήμη του προγράμματος ως γράφος (graph) της μορφής

όπου:
G = γράφος δικτύου (graph)
N = κόμβος (node)
i = προέλευση (origin)
j = προορισμός (destination)
t = χρόνος μετάβασης

Για τη δημιουργία του γράφου αξιοποιήθηκε η δυνατότητα της python να δημιουργεί δομή δεδομένων λεξικού (dictionary), η οποία αποτελεί ένα είδος πίνακα στο οποίο κάθε στοιχείο έχει και ένα κλειδί (label) σε αντίθεση με την απλή μορφή πίνακα (array) στην οποία η αναζήτηση πραγματοποιείται με τον αριθμό στήλης ως κλειδί. Ο γράφος του δικτύου είναι ένα λεξικό G το οποίο περιλαμβάνει ως κλειδιά όλους

τους κόμβους προέλευσης N_i, οι τιμές των οποίων είναι κάθε μία ένα διαφορετικό λεξικό το οποίο περιλαμβάνει ως κλειδιά όλους τους κόμβους προορισμού N_j από το συγκεκριμένο κλειδί N_i εντός του οποίου βρίσκονται και οι τιμή του καθενός ισούται με τον χρόνο μετάβασης t_{ij} του συγκεκριμένου ζεύγους.

β) Δημιουργία αρχικού δικτύου:

Η δημιουργία του αρχικού δικτύου, σε αντίθεση με τις άλλες έρευνες στο συγκεκριμένο πρόβλημα, σε αυτή την εργασία πραγματοποιείται σύμφωνα με τις ανάγκες των δέσμιων χρηστών. Αυτό παρέχει το πλεονέκτημα της δημιουργίας ενός δικτύου με βάση την εξυπηρέτηση των δέσμιων χρηστών, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί πρώτα από όλα το βασικό τους δικαίωμα στη μετακίνηση.

Με βάση τις ιδιαιτερότητες του προβλήματος και σε συνάφεια με τις αντίστοιχες έρευνες, θεωρείται σταθερός αριθμός γραμμών routeN ορισμένος από το χρήστη. Επομένως, για να πραγματοποιηθεί η δημιουργία του αρχικού δικτύου πραγματοποιείται η εξής διαδικασία, η οποία επαναλαμβάνεται τόσες φορές όσες και ο αριθμός των γραμμών που επιλέχθηκε:

1. Από τα δεδομένα μετακινήσεων για τους δέσμιους χρήστες υπολογίζονται με τη χρήση του αλγορίθμου του Dijkstra οι συντομότερες διαδρομές για το συγκεκριμένο δίκτυο. Οι διαδρομές αυτές αποτελούν υποψήφιες γραμμές του αρχικού δικτύου.
2. Σε κάθε υποψήφια γραμμή υπολογίζεται ο αριθμός των μετακινήσεων που μπορούν να εξυπηρετήσουν απευθείας, δηλαδή χωρίς μετεπιβίβαση. Ο υπολογισμός αυτός πραγματοποιείται για το σύνολο των στάσεων της γραμμής, επομένως η κάθε γραμμή ικανοποιεί, θεωρητικά, περισσότερη ζήτηση από το ζεύγος προέλευσης – προορισμού από το οποίο δημιουργήθηκε.
3. Οι υποψήφιες γραμμές κατατάσσονται σε φθίνουσα σειρά βάσει της ζήτησης που ικανοποιεί (υπολογισμένη από το βήμα (2)). Η γραμμή που ικανοποιεί την περισσότερη ζήτηση προστίθεται στο αρχικό δίκτυο.
4. Οι μετακινήσεις που εξυπηρετούνται από την γραμμή που επιλέχθηκε στο βήμα (3) αφαιρούνται από τα δεδομένα μετακινήσεων που χρησιμοποιήθηκαν. Κατά την επιστροφή στο βήμα (1), τα δεδομένα μετακινήσεων είναι υποσύνολο των αρχικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν.

Από την παραπάνω διαδικασία προκύπτει το αρχικό δίκτυο του προβλήματος.

γ) Αξιολόγηση αρχικού δικτύου:

Στη φάση αυτή το αρχικό δίκτυο εισέρχεται σε διαδικασία αξιολόγησης (evaluation), στην οποία υπολογίζονται τα απαραίτητα στοιχεία του δικτύου, δηλαδή τα ποσοστά

μετακινήσεων ανάλογα με τον αριθμό μετεπιβιβάσεων (d_0, d_1, d_2, d_{un}) και ο μέσος χρόνος μετακίνησης ανά επιβάτη (ATT).

Η αξιολόγηση πραγματοποιείται με αλγόριθμο αναθεσης (assignment) των επιβατών στις γραμμές του δικτύου. Για κάθε ζεύγος προέλευσης – προορισμού υπολογίζονται οι υποψήφιες διαδρομές που θα ακολουθήσουν, προσθέτοντας σε κάθε διαδρομή με μετεπιβίβαση την αντίστοιχη ποινή, ανάλογα με τον αριθμό μετεπιβιβάσεων, στον χρόνο διαδρομής. Στη συνέχεια διατηρούνται μόνο οι διαδρομές με τον ελάχιστο χρόνο. Η μέθοδος αυτή περιγράφεται στη βιβλιογραφία ως Μέθοδος 2 (Fan and Mumford, 2010), στην οποία θεωρείται ότι ο επιβάτης έχει πλήρη γνώση του δικτύου, επομένως προτιμά τις διαδρομές με μικρότερο χρόνο σε πρώτο επίπεδο και με μικρότερο αριθμό μετεπιβιβάσεων σε δεύτερο. Διατηρώντας τις εναλλακτικές με τον ελάχιστο χρόνο και τον ελάχιστο αριθμό μετεπιβιβάσεων, η ζήτηση του συγκεκριμένου ζεύγους προέλευσης – προορισμού μοιράζεται στις εναλλακτικές αυτές.

Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων υπολογίζεται το σύνολο των επιβατών που ικανοποιούνται απευθείας (d_0), με μία μετεπιβίβαση (d_1), με δύο μετεπιβιβάσεις (d_2), ή με άνω των δύο μετεπιβιβάσεις (d_{un}), αθροίζονται οι χρόνοι διαδρομής και στο τέλος διαιρούνται με τον αριθμό των μετακινούμενων (ATT).

Η αξιολόγηση του δικτύου, για λόγους σύγκρισης, πραγματοποιείται και για τους δέσμιους χρήστες και για τις συνολικές μετακινήσεις.

δ) Βελτιστοποίηση με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου:

Στη φάση αυτή πραγματοποιείται η βελτίωση του αρχικού δικτύου με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου. Η διαδικασία είναι παρόμοια με αυτή που διατυπώνεται στο Κεφ. 5.2.3, με κάποιες τροποποιήσεις οι οποίες αναλύονται παρακάτω. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

1. Αρχικοποίηση πληθυσμού (Initialization): Στο βήμα αυτό πραγματοποιείται δημιουργία του αρχικού πληθυσμού. Δεδομένου ότι δεν έχει εμφανιστεί ακόμα ποικιλομορφία, το κάθε άτομο του πληθυσμού είναι ίδιο με τα υπόλοιπα και αντίγραφο του αρχικού δικτύου που προέκυψε από τη φάση (β). Για το λόγο αυτό πραγματοποιείται εκ των προτέρων αξιολόγηση του αρχικού δικτύου με υπολογισμό της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης fitness (δε συμπεριλαμβάνεται στη φάση (γ). Το μέγεθος του πληθυσμού εξαρτάται από την παράμετρο popN που ορίζεται από το χρήστη εξ' αρχής. Τέλος, το αρχικό δίκτυο προστίθεται και στην μεταβλητή best, η οποία περιλαμβάνει το καλύτερο δίκτυο που έχει προκύψει μέχρι στιγμής.

2. Μεταφορά των καλύτερων υποψήφιων δικτύων στη νέα γενιά: Χρησιμοποιώντας την τεχνική του ελιτισμού (elitism) και με βάση τον αριθμό καλύτερων λύσεων

eliteN που ορίζεται από τον χρήστη, οι καλύτερες λύσεις προστίθενται αυτούσιες στον νέο πληθυσμό.

3. Εφαρμογή γενετικών τελεστών: Για το σύνολο του πληθυσμού και για αριθμό ίσο με το μισό της διαφοράς του μεγέθους eliteN από το σύνολο του πληθυσμού ((popN – eliteN) / 2), έτσι ώστε ο νέος πληθυσμός να έχει ίδιο αριθμό ατόμων από τον προηγούμενο, πραγματοποιείται επιλογή γονέων με βάση την τεχνική της επιλογής ρουλέτας (roulette wheel selection) και σε αυτούς εφαρμόζονται οι τεχνικές διασταύρωσης (crossover) και μετάλλαξης (mutation), προκειμένου να δημιουργηθούν απόγονοι.

   Πιο συγκεκριμένα, η επιλογή ρουλέτας κατατάσσει με βάση την τιμή fitness τα άτομα του πληθυσμού και υπολογίζει για το καθένα την πιθανότητα επιλογής με βάση την τιμή fitness διαιρεμένη με το άθροισμα των τιμών fitness όλων των ατόμων. Στη συνέχεια υπολογίζεται ένας τυχαίος πραγματικός αριθμός στο διάστημα [0 , 1] και οι τιμές πιθανότητας προστίθενται με τη σειρά μέχρι το άθροισμά τους να ξεπεράσει τον τυχαίο αριθμό. Το άτομο στο οποίο ξεπεράστηκε αυτός ο αριθμός αποτελεί την επιλογή της ρουλέτας. Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία αυτή άλλη μία φορά προκύπτουν οι δύο “γονείς”.

   Στη συνέχεια, στους γονείς εφαρμόζεται ο γενετικός τελεστής της διασταύρωσης (crossover). Επιλέγεται ένας τυχαίος πραγματικός αριθμός στο διάστημα [0 , 1] και, εφόσον είναι μικρότερος από τον δοσμένο από τον χρήστη αριθμό p_{swap} (crossover rate), πραγματοποιείται η τεχνική της διασταύρωσης. Σε περίπτωση που τελικά πραγματοποιείται διασταύρωση, επιλέγεται ένας τυχαίος ακέραιος αριθμός στο διάστημα [0 , routeN – 1]. Με βάση τον αριθμό αυτό επιλέγεται η θέση στην οποία πραγματοποιείται η εναλλαγή γραμμής μεταξύ των δύο δικτύων. Τα δύο νέα δίκτυα αποτελούν τα “παιδιά” ch_1, ch_2.

   Τέλος, εφαρμόζεται ο τελεστής της μετάλλαξης (mutation). Σε αντίθεση με τον τελεστή της διασταύρωσης, αυτός εφαρμόζεται πάντα, όμως χωρίζεται σε δύο κατηγορίες:

   - Μικρή τροποποίηση (small modification): Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγεται από το δίκτυο μία γραμμή με την επιλογή ρουλέτας, στην οποία ως βάρος λαμβάνεται το αντίστροφο της ζήτησης που μπορεί να ικανοποιήσει απευθείας, έτσι ώστε να επιλέγονται με μεγαλύτερη πιθανότητα οι “χειρότερες” γραμμές. Στη συνέχεια, επιλέγεται τυχαίος ακέραιος αριθμός στο διάστημα [0 , 1] και, ανάλογα με αυτό τον αριθμό, επιλέγεται προς τροποποίηση η αφετηρία ή το τέρμα της γραμμής (πρώτος ή τελευταίος κόμβος αντίστοιχα). Έπειτα, με βάση την πιθανότητα p_{del}, η οποία ορίζεται από τον χρήστη, επιλέγεται τυχαίος πραγματικός αριθμός στο διάστημα [0 , 1]. Αν ο αριθμός αυτός είναι μικρότερος από την πιθανότητα p_{del}, τότε ο επιλεγμένος κόμβος αφαιρείται από τη γραμμή. Αν είναι μεγαλύτερος, τότε, με βάση το

εισηγμένο δίκτυο, επιλέγεται τυχαία ένας κόμβος από τους γειτονικούς του επιλεγμένου κόμβου (ο οποίος δεν περιλαμβάνεται ήδη στη γραμμή) και προστίθεται σε αυτή. Σε περίπτωση μη ύπαρξης γειτονικού κόμβου που να πληροί τις προϋποθέσεις, ο αλγόριθμος δεν τροποποιεί τη γραμμή.

- Μεγάλη τροποποίηση (big modification): Σε αυτή την περίπτωση επιλέγεται τυχαία η αφετηρία ή το τέρμα της γραμμής (ομοίως με την περίπτωση της μικρής τροποποίησης. Στη συνέχεια, όμως, καταγράφονται όλες οι συντομότερες διαδρομές από ή προς το επιλεγμένο σημείο με τη βοήθεια του αλγορίθμου του Dijkstra και κατατάσσονται σε φθίνουσα σειρά με βάση τη ζήτηση που μπορούν να ικανοποιήσουν απευθείας. Έπειτα, με τη μέθοδο επιλογής ρουλέτας με βάρος που προκύπτει από την ικανοποίηση απευθείας ζήτησης, επιλέγεται η διαδρομή που θα αποτελέσει τη νέα γραμμή. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει υποψήφια εναλλακτική διαδρομή (συνήθως εμφανίζεται αυτή η περίπτωση λόγω μηδενικής ζήτησης στον επιλεγμένο κόμβο) επιλέγεται ο άλλος κόμβος (αφετηρία αν προηγουμένως είχε επιλεχθεί το τέρμα ή το αντίστροφο) και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Η επιλογή του τύπου τροποποίησης που θα εφαρμοστεί βασίζεται στην πιθανότητα p_{ms}, η οποία καθορίζει την πιθανότητα να πραγματοποιηθεί μικρή τροποποίηση. Η πιθανότητα αυτή είναι συνήθως μεγάλη, διότι η μεγάλη τροποποίηση χρησιμοποιείται για την αποφυγή εγκλωβισμού σε τοπικά μέγιστα, παρέχοντας αρκετά μεγάλες τροποποιήσεις για να συνεχιστεί η αναζήτηση καλύτερων λύσεων. Η διαδικασία της μετάλλαξης πραγματοποιείται δύο φορές, μία για κάθε “παιδί”.

4. Αξιολόγηση παραγόμενων δικτύων: Τα παραγόμενα από τις παραπάνω διαδικασίες δίκτυα (“παιδιά”) αξιολογούνται, προκειμένου να υπολογιστούν οι τιμές fitness του καθενός. Στη συνέχεια προστίθενται στον νέο πληθυσμό και πραγματοποιείται κατάταξη του νέου πληθυσμού σε αύξουσα σειρά με βάση την τιμή fitness.

5. Εξέταση ύπαρξης καλύτερης λύσης: Η τιμή fitness του πρώτου στη σειρά ατόμου του νέου πληθυσμού συγκρίνεται με αυτή του ατόμου που βρίσκεται στην μεταβλητή best. Αν η τιμή fitness του ατόμου που βρίσκεται στη μεταβλητή best είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του πρώτου στον νέο πληθυσμό (δηλαδή χειρότερο αποτέλεσμα), τότε η μεταβλητή best ορίζεται από την πρώτη του νέου πληθυσμού.

6. Έλεγχος συνθήκης τερματισμού: Στο συγκεκριμένο πρόγραμμα επιλέχθηκε ως συνθήκη τερματισμού αυτή του συγκεκριμένου αριθμού επαναλήψεων. Ο αριθμός αυτός ορίζεται εκ των προτέρων από τον χρήστη. Σε περίπτωση που ικανοποιείται η συνθήκη τερματισμού, ο γενετικός αλγόριθμος λήγει και επιστρέφει την τιμή του δικτύου που βρίσκεται στη μεταβλητή best. Σε περίπτωση που δεν ικανοποιείται, τότε ο αριθμός επαναλήψεων αυξάνεται κατά

μία μονάδα, ο αρχικός πληθυσμός αντικαθίσταται από τον νέο και ο νέος πληθυσμός διαγράφεται. Μετά από αυτό, ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα (2).

ε) Αξιολόγηση και υπολογισμός οχημάτων:

Στη συγκεκριμένη φάση επαναλαμβάνεται η διαδικασία αξιολόγησης που πραγματοποιήθηκε στη φάση (γ) για το τελικό δίκτυο που προέκυψε από τον γενετικό αλγόριθμο (φάση (δ)). Επιπρόσθετα, στη φάση αυτή υπολογίζεται η ζήτηση κάθε γραμμής για κάθε σύνδεσμο, καθώς και τα λειτουργικά στοιχεία των γραμμών.

Με την ανάθεση των επιβατών στο δίκτυο (assignment) που πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της αξιολόγησης μπορούν να υπολογιστούν οι φορτίσεις σε κάθε σύνδεσμο, δηλαδή η ζήτηση σε κάθε σύνδεσμο. Από τις φορτίσεις αυτές, με βάση τη μέγιστη φόρτιση κάθε γραμμής, υπολογίζεται η απαραίτητη συχνότητα διέλευσης των οχημάτων. Αρχικά, χρησιμοποιούνται τυπικά λεωφορεία 80 θέσεων και, διαιρώντας τη φόρτιση με τον αριθμό των θέσεων, προκύπτει ο αριθμός των απαραίτητων λεωφορείων ανά ώρα. Σε περίπτωση συχνότητας μεγαλύτερης των 12 οχημάτων ανά ώρα (δηλαδή χρονοαπόσταση μικρότερη των 5 λεπτών) επιλέγονται αρθρωτά λεωφορεία 150 θέσεων και ο υπολογισμός επαναλαμβάνεται. Έπειτα, για κάθε γραμμή υπολογίζεται ο χρόνος διαδρομής, ο οποίος πολλαπλασιάζεται με 2.2 (*2 για επιστροφή + 10% ανά κατεύθυνση για χρόνο επαναφοράς). Στη συνέχεια, με βάση το χρόνο διαδρομής και τη συχνότητα διέλευσης, υπολογίζεται ο απαραίτητος αριθμός οχημάτων. Στα αποτελέσματα που προκύπτουν περιλαμβάνεται για κάθε γραμμή ο πίνακας των φορτίσεων ανά σύνδεσμο, η μέγιστη φόρτιση, η συχνότητα διέλευσης, ο τύπος οχήματος και ο απαραίτητος αριθμός οχημάτων. Επιπρόσθετα, υπολογίζεται και προστίθεται στα αποτελέσματα ο αριθμός της μέγιστης φόρτισης που προκύπτει με βάση τη συχνότητα διέλευσης και τον τύπο οχήματος. Κανονικά, η μέγιστη φόρτιση είναι μικρότερη ή οριακά ίση με τη μέγιστη φόρτιση που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της συχνότητας, όμως, επειδή έχει προηγηθεί στρογγυλοποίηση προς τα πάνω λόγω ακέραιου αριθμού οχημάτων και συχνότητας, η τιμή της συνήθως είναι μεγαλύτερη.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι παράμετροι που ορίστηκαν από τον χρήστη, καθώς και οι τιμές που δόθηκαν και τα αποτελέσματα του προγράμματος.

6. Εφαρμογή – Αποτελέσματα

Για την επίλυση του προβλήματος σχεδιασμού χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε για την παρούσα εργασία και περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφ. 5. Η επίλυση πραγματοποιήθηκε για δίκτυα με 6, 7 και 8 γραμμές.

Η δομή της εφαρμογής του προγράμματος και της παρουσίασης των αποτελεσμάτων βασίζεται στη λογική της κατηγοριοποίησης με βάση τον αριθμό των γραμμών. Σε κάθε κατηγορία αναλύονται τρία βήματα:

α) Επιλογή κατάλληλων παραμέτρων

β) Αποτελέσματα βελτιστοποίησης

γ) Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων

6.1. Επίλυση δικτύου 6 γραμμών

6.1.1. Επιλογή παραμέτρων

Για την επίλυση του δικτύου με 6 γραμμές είναι απαραίτητο να οριστούν οι βασικές παράμετροι που δίνονται στο πρόγραμμα εκ των προτέρων. Πρόκειται για κάποιες αρχικές παραμέτρους σχετικά με την επιθυμητή μορφή του δικτύου, καθώς και παράμετροι σχετικές με τον γενετικό αλγόριθμο.

Οι αρχικές παράμετροι του προβλήματος είναι οι εξής:

- Ελάχιστο μήκος γραμμής: s_{min} = 4 κόμβοι
- Μέγιστο μήκος γραμμής: s_{max} = 8 κόμβοι
- Ποινή μετεπιβίβασης: $penalty_{transf}$ = 5 min

Οι παράμετροι του γενετικού αλγορίθμου, όπως αναλύθηκαν στο Κεφ. 5.3.2.δ είναι οι εξής:

- Μέγεθος πληθυσμού: popN = 20
- Μέγεθος ελίτ: eliteN = 8
- Αριθμός επαναλήψεων: iterN = 150
- Συντελεστής διασταύρωσης (crossover rate): p_{swap} = 1 / lineN = 1 / 6
- Συντελεστής μικρής τροποποίησης (small mod rate): p_{ms} = 0.9
- Συντελεστής διαγραφής κόμβου: p_{del} = 0.4

6.1.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων

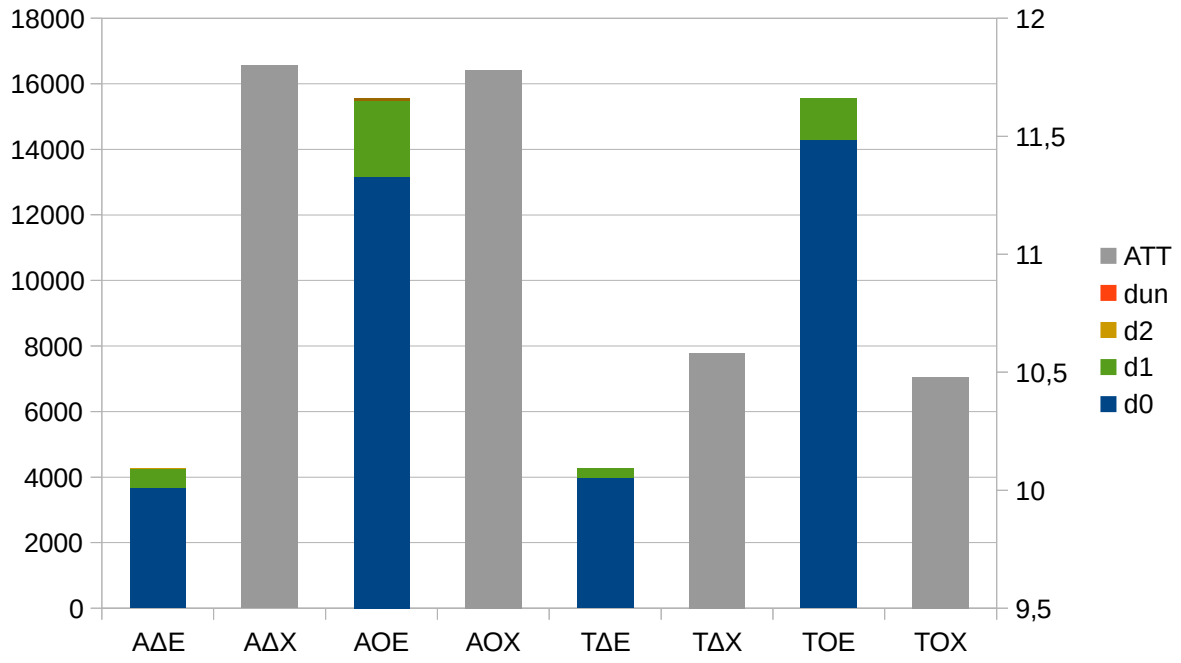
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τη συγκεκριμένη κατηγορία δικτύου παρουσιάζονται παρακάτω. Τα αποτελέσματα αφορούν την αξιολόγηση του αρχικού και του τελικού δικτύου τόσο από την πλευρά των δέσμιων χρηστών, όσο και από την πλευρά του συνόλου των χρηστών. Στον πίνακα 6.1.1 παρουσιάζονται τα μεγέθη που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Μέγεθος	Αρχικό δίκτυο Δέσμιοι χρήστες	Αρχικό δίκτυο Σύνολο χρηστών	Τελικό δίκτυο Δέσμιοι χρήστες	Τελικό δίκτυο Σύνολο χρηστών
ATT	11,8	11,79	10,58	10,48
d_0	86,48	84,46	93,00	91,91
d_1	13,15	14,96	7,00	8,09
d_2	0,38	0,58	0,00	0,00
d_{un}	0,00	0,00	0,00	0,00

Πίν. 6.1.1. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για δίκτυο 6 γραμμών

Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα είναι όντως βελτιωμένα, τόσο για τους δέσμιους χρήστες, όσο και για το σύνολο των μετακινούμενων. Αυτό σημαίνει ότι ο αλγόριθμος παράγει νέες καλύτερες λύσεις, ενώ ταυτόχρονα τα αποτελέσματα, κρίνοντας από τον μέσο χρόνο ανά επιβάτη, είναι ικανοποιητικά και για τις δύο κατηγορίες επιβατών. Επίσης, ένα ακόμα στοιχείο που επιδρά θετικά στα συγκεκριμένα αποτελέσματα είναι η πραγματοποίηση του συνόλου των μετακινήσεων με μία μετεπιβίβαση το πολύ και για τις δύο κατηγορίες επιβατών.

Στο Διάγ. 6.1.1 παρέχεται εποπτική αποτύπωση των αποτελεσμάτων.



Διάγ. 6.1.1. Αποτελέσματα προγράμματος για δίκτυο 6 γραμμών

Οι κατηγορίες μεγεθών επεξηγούνται στο υπόμνημα. Ο αριστερός Y-άξονας σχετίζεται με τα μεγέθη επιβατικής κίνησης, ενώ ο δεξιός Y-άξονας σχετίζεται με τον μέσο χρόνο διαδρομής κάθε περίπτωσης. Η κωδικοποίηση του X-άξονα πραγματοποιείται με τη χρήση τριών γραμμάτων, τα οποία αναλύονται ως εξής:

Α: Αρχικό δίκτυο – Τ: Τελικό δίκτυο
Δ: Δέσμιοι χρήστες – Ο: Σύνολο χρηστών
Ε: Ποσοστά επιβατών – Χ: Μέσος Χρόνος Μετακίνησης

Ο σχεδιασμός των γραμμών του δικτύου, δηλαδή η αλληλουχία στάσεων, παρουσιάζεται στον πίνακα 6.1.2:

1:	0	1	2	5	7	9	10	12
2:	4	3	5	7	9	12	13	
3:	0	1	2	5	14	6		
4:	8	14	6	9	10	11		
5:	8	14	5	7	9	13		
6:	0	1	3	11				

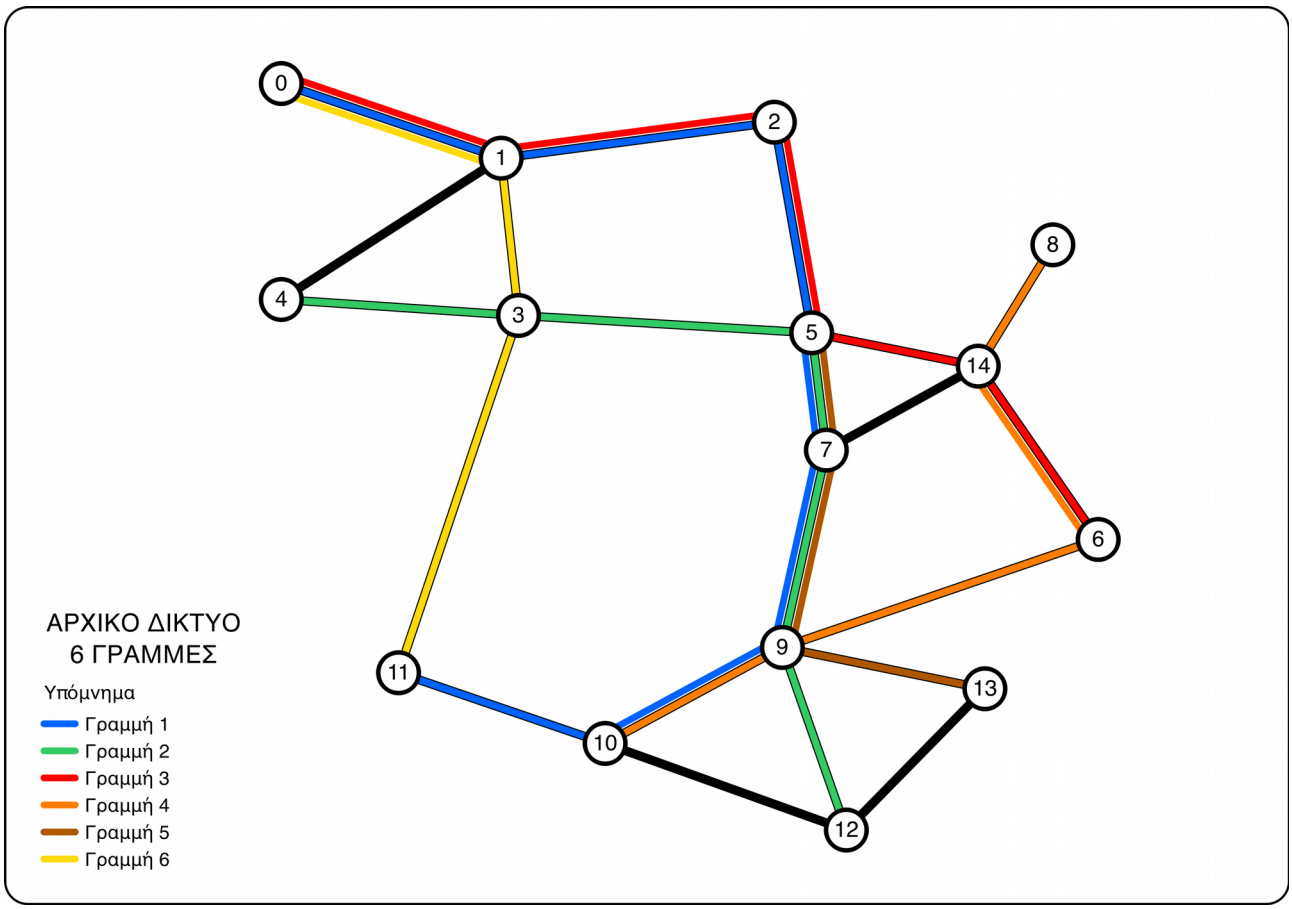
Πίν. 6.1.2. Η μορφή του τελικού δικτύου

Για συνολική εποπτεία του δικτύου, στα Διαγ. 6.1.2, 6.1.3 παρουσιάζονται το αρχικό και το βελτιστοποιημένο δίκτυο, αντίστοιχα.

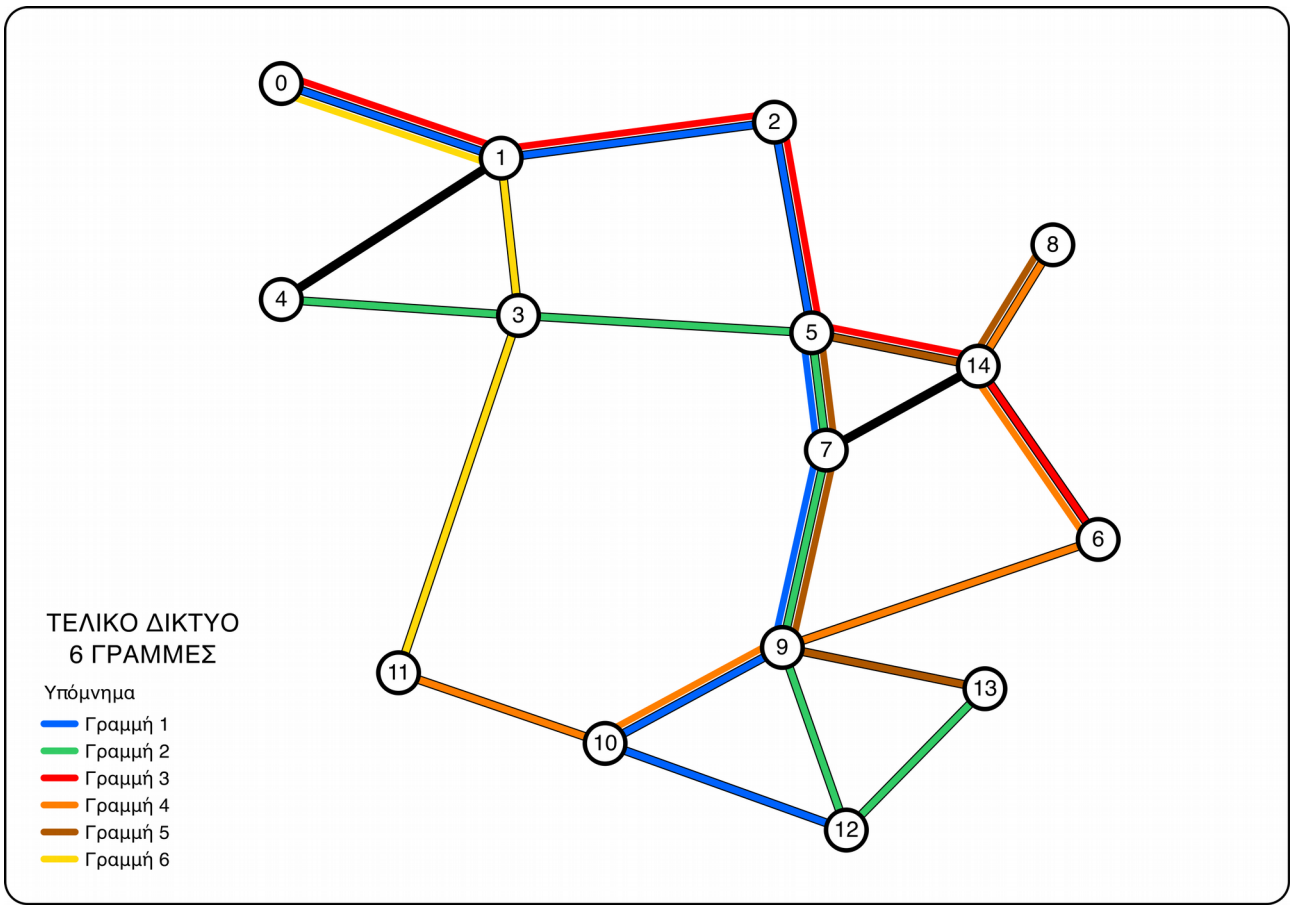
Τα λειτουργικά στοιχεία των γραμμών του τελικού δικτύου παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1.3, ενώ στον πίνακα 6.1.4 παρουσιάζονται οι φορτίσεις ανά σύνδεσμο για κάθε γραμμή, με βάση την εξυπηρετούμενη ζήτηση.

	Χρ. κύκλου (min)	**Συχνότητα (veh/h)**	**Αρ. οχημάτων (veh)**	**Τύπος οχήματος (N,A)**	**Μέγ. Μεταφορική ικανότητα (pas/h)**
1	33	16	20	A	2400
2	30	12	14	A	1800
3	18	8	6	A	1200
4	32	9	11	A	1350
5	29	12	13	N	960
6	21	10	8	N	800

Πίν. 6.1.3. Λειτουργικά στοιχεία του τελικού δικτύου



Διάγ. 6.1.2. Το αρχικό δίκτυο 6 γραμμών



Διάγ. 6.1.3. Το τελικό δίκτυο 6 γραμμών

1	0	1	2	5	7	9	10	12
	1230	1756	2038	2274	2076	1660	1006	
2	4	3	5	7	9	12	13	
	960	1700	1706	1722	570	130		
3	0	1	2	5	14	6		
	808	1022	1162	972	940			
4	8	14	6	9	10	11		
	386	380	1328	1276	820			
5	8	14	5	7	9	13		
	218	232	770	920	456			
6	0	1	3	11				
	596	730	220					

Πίν 6.1.4. Φορτίσεις ανά γραμμή ανά σύνδεσμο

6.1.3. Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων

Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιείται για να περιγραφεί ποιοτικά ο τρόπος που επηρεάζει κάθε παράμετρος τα αποτελέσματα του προγράμματος. Για να πραγματοποιηθεί αυτό επιλέχθηκαν οι βασικότερες παράμετροι του γενετικού αλγορίθμου, οι οποίες αυξήθηκαν και μειώθηκαν κατά ένα ποσό ανάλογο με την τάξη μεγέθους. Στη συνέχεια, με τις παραμέτρους τροποποιημένες κατά μία κάθε φορά επαναλήφθηκε η επίλυση του προγράμματος και καταγράφησαν τα αποτελέσματα. Οι μεταβλητές που επιλέχθηκαν για την ανάλυση ευαισθησίας, καθώς και οι μεταβολές τους είναι οι εξής:

- popN, eliteN (±4 και για τα δύο ταυτόχρονα, έτσι ώστε να μείνει σταθερός ο αριθμός νέων ατόμων)
- p_{ms} (± 0,1)
- p_{del} (± 0,1)

Για πρακτικούς λόγους, η σύγκριση πραγματοποιείται για την αξιολόγηση του συνόλου των χρηστών. Αναλυτικά αποτελέσματα επισυνάπτονται στο παράρτημα. Στον πίνακα 6.1.5 απεικονίζονται οι μεταβολές στα αποτελέσματα του προγράμματος.

	Αρχ.	**Τελ.**	**PopN + 4**	**PopN – 4**	**P_{ms} + 0,1**	**P_{ms} – 0,1**	**P_{del} + 0,1**	**P_{del} – 0,1**
ATT	11,79	10,48	10,63	10,59	10,50	10,52	11,50	10,53
d_0	84,46	91,91	93,26	92,10	91,78	94,03	92,61	91,39
d_1	14,96	8,09	6,23	7,90	7,45	5,97	7,39	8,09
d_2	0,58	0,00	0,51	0,00	0,77	0,00	0,00	0,51
d_{un}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Πίν. 6.1.5. Μεταβολές στα αποτελέσματα από την ανάλυση ευαισθησίας

Η επιρροή των παραμέτρων στα αποτελέσματα θα αναλυθούν συνολικά για όλες τις κατηγορίες δικτύων στο Κεφ. 6.4.

6.2. Επίλυση δικτύου 7 γραμμών

6.2.1. Επιλογή παραμέτρων

Οι αρχικές παράμετροι του προβλήματος είναι οι εξής:

- Ελάχιστο μήκος γραμμής: s_{min} = 4 κόμβοι
- Μέγιστο μήκος γραμμής: s_{max} = 8 κόμβοι
- Ποινή μετεπιβίβασης: $penalty_{transf}$ = 5 min

Οι παράμετροι του γενετικού αλγορίθμου είναι οι εξής:

- Μέγεθος πληθυσμού: popN = 20
- Μέγεθος ελίτ: eliteN = 8
- Αριθμός επαναλήψεων: iterN = 150
- Συντελεστής διασταύρωσης (crossover rate): p_{swap} = 1 / lineN = 1 / 7
- Συντελεστής μικρής τροποποίησης (small mod rate): p_{ms} = 0.8
- Συντελεστής διαγραφής κόμβου: p_{del} = 0.3

6.2.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων

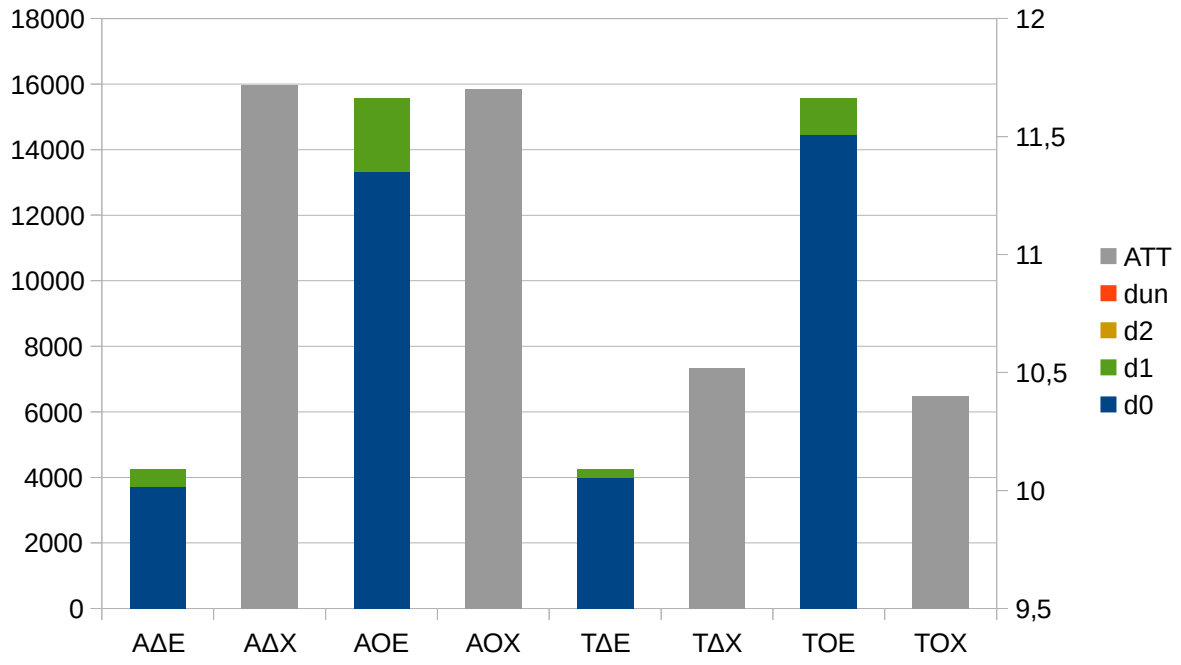
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τη συγκεκριμένη κατηγορία δικτύου παρουσιάζονται παρακάτω. Τα αποτελέσματα αφορούν την αξιολόγηση του αρχικού και του τελικού δικτύου τόσο από την πλευρά των δέσμιων χρηστών, όσο και από την πλευρά του συνόλου των χρηστών. Στον πίνακα 6.2.1 παρουσιάζονται τα μεγέθη που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Μέγεθος	Αρχικό δίκτυο Δέσμιοι χρήστες	Αρχικό δίκτυο Σύνολο χρηστών	Τελικό δίκτυο Δέσμιοι χρήστες	Τελικό δίκτυο Σύνολο χρηστών
ATT	11,72	11,70	10,52	10,40
d_0	87,70	85,61	93,80	92,94
d_1	12,30	14,39	6,20	7,06
d_2	0,00	0,00	0,00	0,00
d_{un}	0,00	0,00	0,00	0,00

Πίν. 6.2.1. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για δίκτυο 7 γραμμών

Όπως και την περίπτωση του δικτύου 6 γραμμών, παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος βελτιώνει τα αποτελέσματα με την παραγωγή νέων καλύτερων λύσεων, ενώ ταυτόχρονα οι χρόνοι διαδρομής είναι ικανοποιητικοί και για τις δύο κατηγορίες μετακινούμενων. Και σε αυτή την περίπτωση ο μέγιστος αριθμός μετεπιβιβάσεων για τις δύο κατηγορίες είναι 1.

Στο Διάγ. 6.2.1 παρέχεται εποπτική αποτύπωση των αποτελεσμάτων.



Διάγ. 6.2.1. Αποτελέσματα προγράμματος για δίκτυο 7 γραμμών

Οι κατηγορίες μεγεθών επεξηγούνται στο υπόμνημα. Ο αριστερός Y-άξονας σχετίζεται με τα μεγέθη επιβατικής κίνησης, ενώ ο δεξιός Y-άξονας σχετίζεται με τον μέσο χρόνο διαδρομής κάθε περίπτωσης. Η κωδικοποίηση του X-άξονα πραγματοποιείται με τη χρήση τριών γραμμάτων, τα οποία αναλύονται ως εξής:

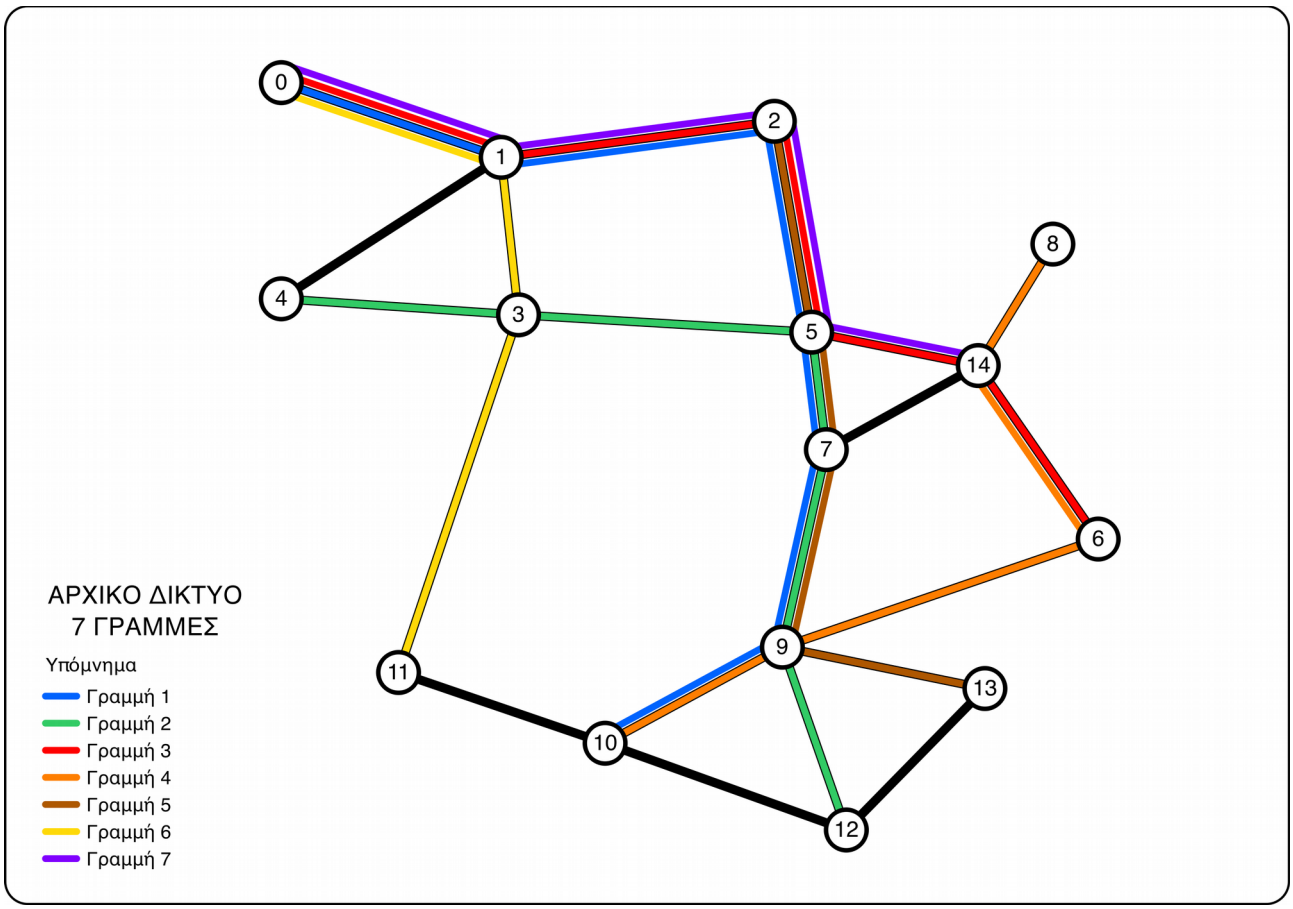
Α: Αρχικό δίκτυο – Τ: Τελικό δίκτυο
Δ: Δέσμιοι χρήστες – Ο: Σύνολο χρηστών
Ε: Ποσοστά επιβατών – Χ: Μέσος Χρόνος Μετακίνησης

Ο σχεδιασμός των γραμμών του δικτύου, δηλαδή η αλληλουχία στάσεων, παρουσιάζεται στον πίνακα 6.2.2:

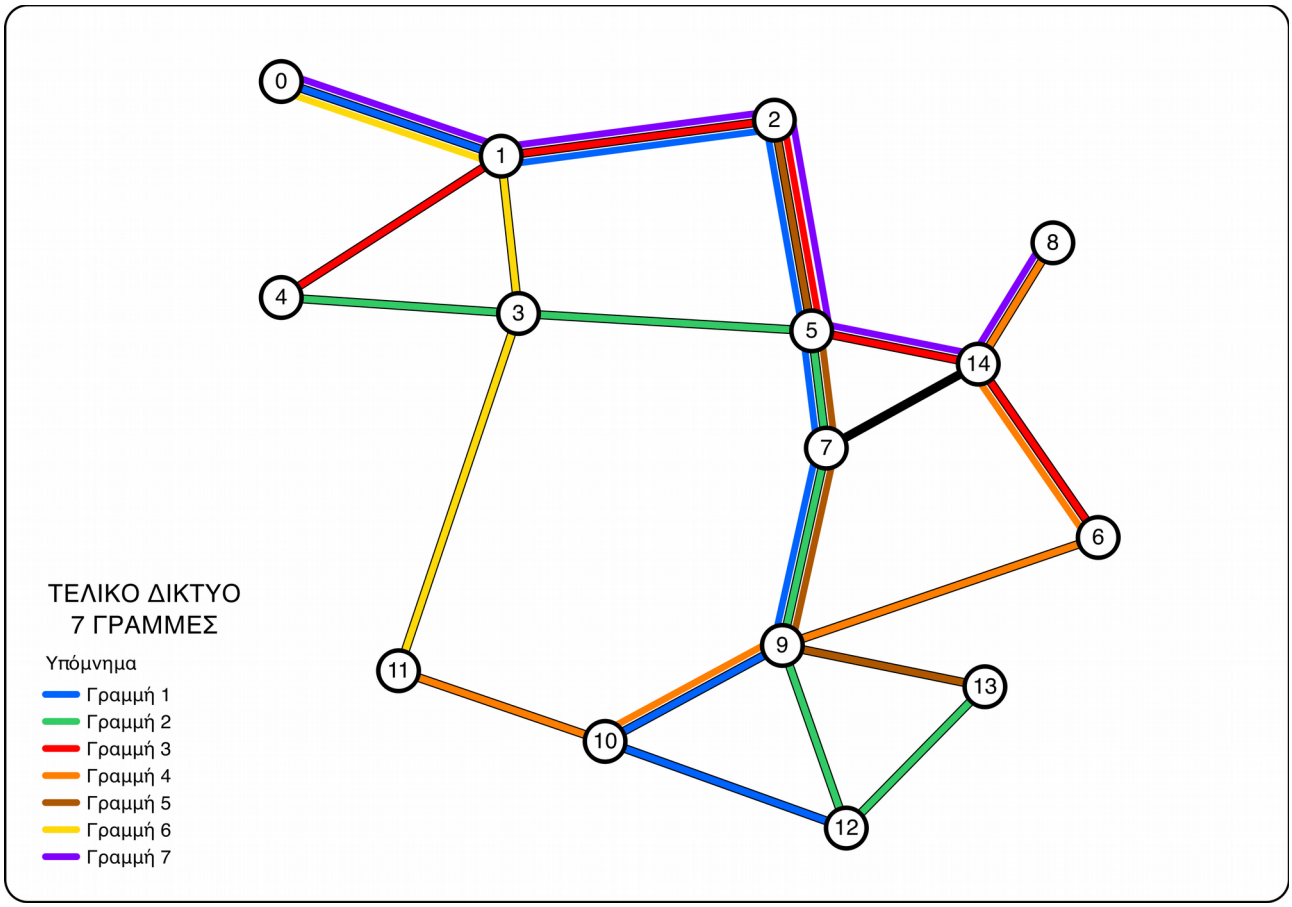
1:	0	1	2	5	7	9	10	12
2:	4	3	5	7	9	12	13	
3:	4	1	2	5	14	6		
4:	8	14	6	9	10	11		
5:	2	5	7	9	13			
6:	0	1	3	11				
7:	0	1	2	5	14	8		

Πίν. 6.2.2. Η μορφή του τελικού δικτύου

Για συνολική εποπτεία του δικτύου, στα Διαγ. 6.2.2, 6.2.3 παρουσιάζονται το αρχικό και το βελτιστοποιημένο δίκτυο, αντίστοιχα.



Διάγ. 6.2.2. Το αρχικό δίκτυο 7 γραμμών



Διάγ. 6.2.3. Το τελικό δίκτυο 7 γραμμών

Τα λειτουργικά στοιχεία των γραμμών του τελικού δικτύου παρουσιάζονται στον πίνακα 6.2.3, ενώ στον πίνακα 6.2.4 παρουσιάζονται οι φορτίσεις ανά σύνδεσμο για κάθε γραμμή, με βάση την εξυπηρετούμενη ζήτηση.

	Χρ. κύκλου (min)	Συχνότητα (veh/h)	Αρ. οχημάτων (veh)	Τύπος οχήματος (N,A)	Μέγ. Μεταφορική ικανότητα (pas/h)
1	33	15	19	A	2250
2	30	12	14	A	1800
3	16	12	8	N	960
4	32	9	11	A	1350
5	21	7	6	A	1050
6	21	7	6	N	560
7	24	11	10	N	880

Πίν. 6.2.3. Λειτουργικά στοιχεία του τελικού δικτύου

1	0	1	2	5	7	9	10	12
	1316	1666	1670	2152	2026	1660	1006	
2	4	3	5	7	9	12	13	
	590	1530	1728	1722	570	130		
3	4	1	2	5	14	6		
	366	582	700	918	934			
4	8	14	6	9	10	11		
	360	376	1328	1276	820			
5	2	5	7	9	13			
	234	858	962	450				
6	0	1	3	11				
	504	526	218					
7	0	1	2	5	14	8		
	808	688	528	292	260			

Πίν 6.2.4. Φορτίσεις ανά γραμμή ανά σύνδεσμο

6.2.3. Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων

Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιείται για να περιγραφεί ποιοτικά ο τρόπος που επηρεάζει κάθε παράμετρος τα αποτελέσματα του προγράμματος. Για να πραγματοποιηθεί αυτό επιλέχθηκαν οι βασικότερες παράμετροι του γενετικού αλγορίθμου, οι οποίες αυξήθηκαν και μειώθηκαν κατά ένα ποσό ανάλογο με την τάξη μεγέθους. Στη συνέχεια, με τις παραμέτρους τροποποιημένες κατά μία κάθε φορά επαναλήφθηκε η επίλυση του προγράμματος και καταγράφησαν τα αποτελέσματα. Οι μεταβλητές που επιλέχθηκαν για την ανάλυση ευαισθησίας, καθώς και οι μεταβολές τους είναι οι εξής:

- popN, eliteN (±4 και για τα δύο ταυτόχρονα, έτσι ώστε να μείνει σταθερός ο αριθμός νέων ατόμων)
- p_{ms} (± 0,1)
- p_{del} (± 0,1)

Για πρακτικούς λόγους, η σύγκριση πραγματοποιείται για την αξιολόγηση του συνόλου των χρηστών. Αναλυτικά αποτελέσματα επισυνάπτονται στο παράρτημα. Στον πίνακα 6.2.5 απεικονίζονται οι μεταβολές στα αποτελέσματα του προγράμματος.

	Αρχ.	Τελ.	PopN + 4	PopN – 4	P_{ms} + 0,1	P_{ms} – 0,1	P_{del} + 0,1	P_{del} – 0,1
ATT	11,70	10,40	10,48	10,42	10,58	10,50	10,60	10,59
d_0	85,61	92,94	91,84	92,55	92,36	94,09	94,16	94,16
d_1	14,39	7,06	8,16	7,45	7,64	5,91	5,52	5,84
d_2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	0,00
d_{un}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Πίν. 6.2.5. Μεταβολές στα αποτελέσματα από την ανάλυση ευαισθησίας

Η επιρροή των παραμέτρων στα αποτελέσματα θα αναλυθούν συνολικά για όλες τις κατηγορίες δικτύων στο Κεφ. 6.4. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι, όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας, οι παράμετροι p_{ms} και p_{del} επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τις παραγόμενες λύσεις σε σχέση με την μεταβολή του πληθυσμού.

6.3. Επίλυση δικτύου 8 γραμμών

6.3.1. Επιλογή παραμέτρων

Οι αρχικές παράμετροι του προβλήματος είναι οι εξής:

- Ελάχιστο μήκος γραμμής: s_{min} = 4 κόμβοι
- Μέγιστο μήκος γραμμής: s_{max} = 8 κόμβοι
- Ποινή μετεπιβίβασης: $penalty_{transf}$ = 5 min

Οι παράμετροι του γενετικού αλγορίθμου είναι οι εξής:

- Μέγεθος πληθυσμού: popN = 16
- Μέγεθος ελίτ: eliteN = 4
- Αριθμός επαναλήψεων: iterN = 150
- Συντελεστής διασταύρωσης (crossover rate): p_{swap} = 1 / lineN = 1 / 8
- Συντελεστής μικρής τροποποίησης (small mod rate): p_{ms} = 0.8
- Συντελεστής διαγραφής κόμβου: p_{del} = 0.3

6.3.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων

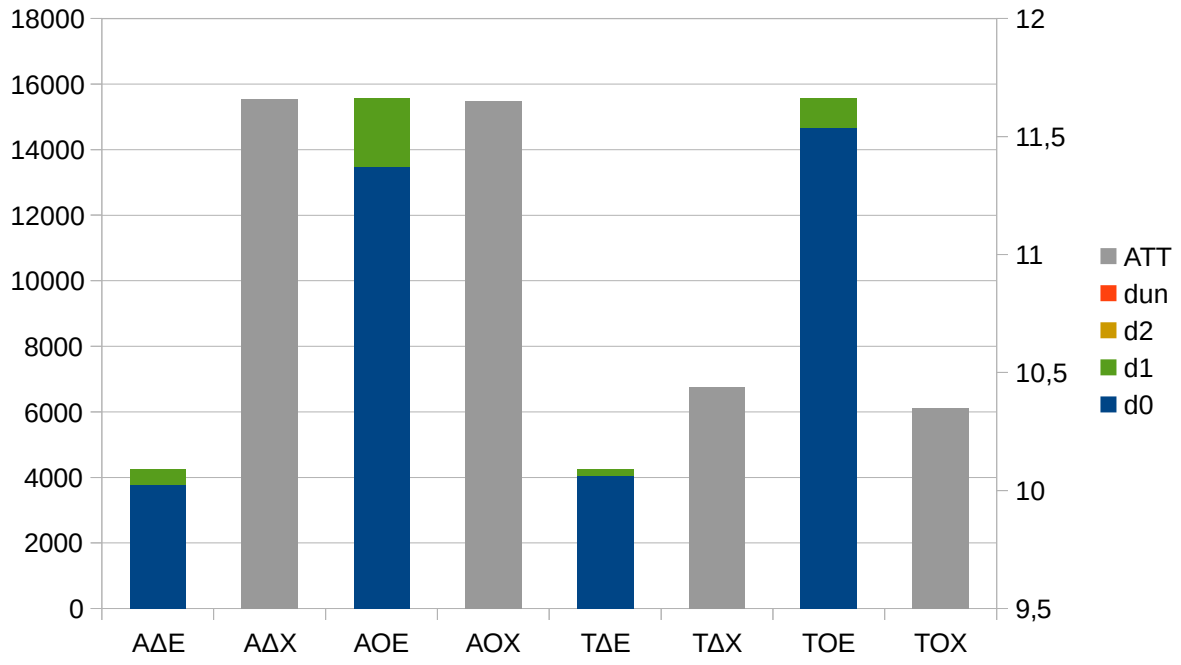
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τη συγκεκριμένη κατηγορία δικτύου παρουσιάζονται παρακάτω. Τα αποτελέσματα αφορούν την αξιολόγηση του αρχικού και του τελικού δικτύου τόσο από την πλευρά των δέσμιων χρηστών, όσο και από την πλευρά του συνόλου των χρηστών. Στον πίνακα 6.3.1 παρουσιάζονται τα μεγέθη που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Μέγεθος	Αρχικό δίκτυο Δέσμιοι χρήστες	Αρχικό δίκτυο Σύνολο χρηστών	Τελικό δίκτυο Δέσμιοι χρήστες	Τελικό δίκτυο Σύνολο χρηστών
ATT	11,66	11,65	10,44	10,35
d_0	88,92	86,58	95,54	94,16
d_1	11,08	13,42	4,46	5,84
d_2	0,00	0,00	0,00	0,00
d_{un}	0,00	0,00	0,00	0,00

Πίν. 6.3.1. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για δίκτυο 8 γραμμών

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, είναι εμφανές ότι ο αλγόριθμος βελτιώνει αισθητά τα αποτελέσματα μέσω της παραγωγής νέων καλύτερων λύσεων, ενώ οι χρόνοι διαδρομής είναι ικανοποιητικοί και για τις δύο κατηγορίες μετακινούμενων. Ακόμη, ο μέγιστος αριθμός μετεπιβιβάσεων δεν υπερβαίνει την 1 για τις δύο αυτές κατηγορίες.

Στο Διάγ. 6.3.1 παρέχεται εποπτική αποτύπωση των αποτελεσμάτων.



Διάγ. 6.3.1. Αποτελέσματα προγράμματος για δίκτυο 8 γραμμών

Οι κατηγορίες μεγεθών επεξηγούνται στο υπόμνημα. Ο αριστερός Υ-άξονας σχετίζεται με τα μεγέθη επιβατικής κίνησης, ενώ ο δεξιός Υ-άξονας σχετίζεται με τον μέσο χρόνο διαδρομής κάθε περίπτωσης. Η κωδικοποίηση του Χ-άξονα πραγματοποιείται με τη χρήση τριών γραμμάτων, τα οποία αναλύονται ως εξής:

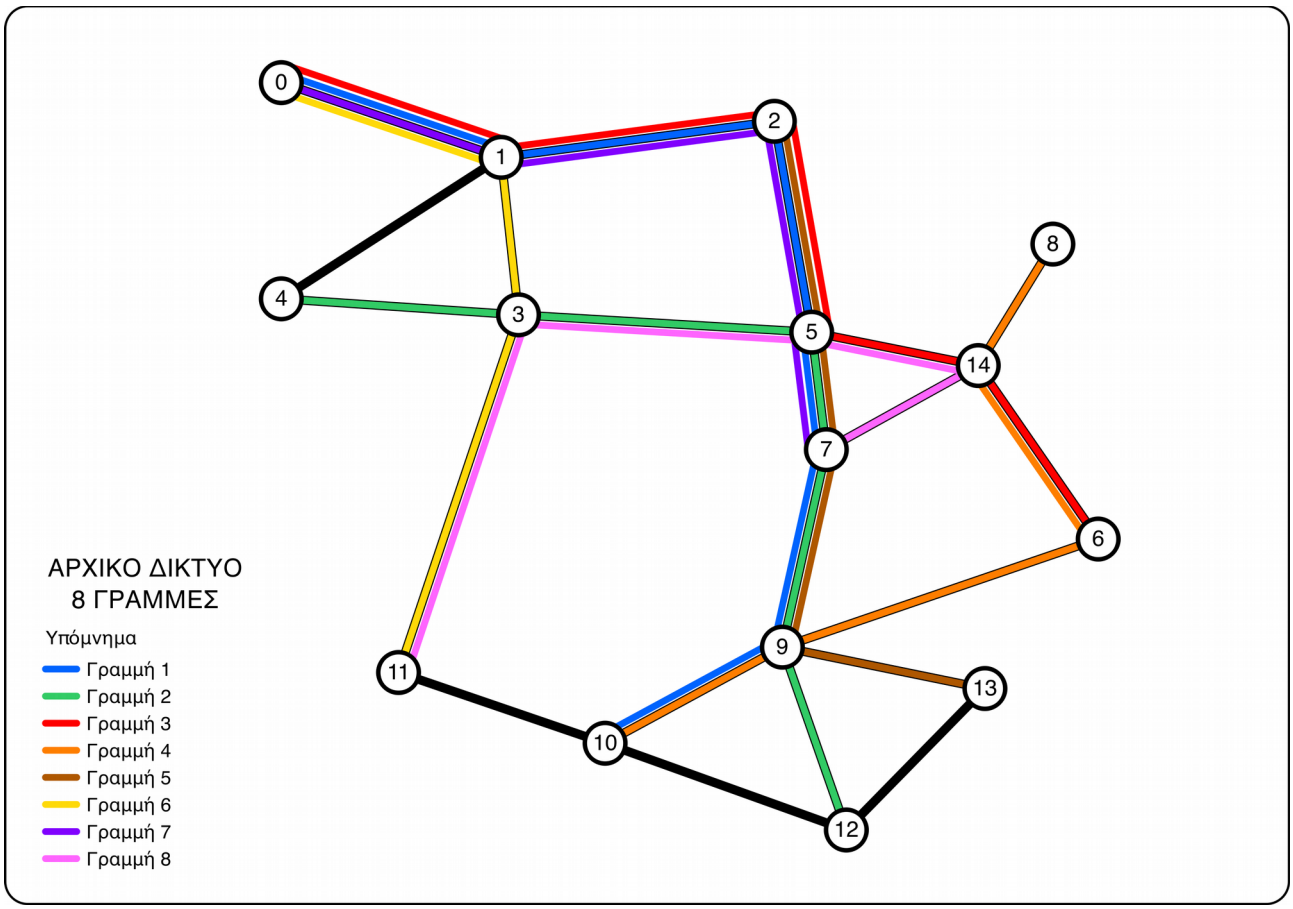
Α: Αρχικό δίκτυο – Τ: Τελικό δίκτυο
Δ: Δέσμιοι χρήστες – Ο: Σύνολο χρηστών
Ε: Ποσοστά επιβατών – Χ: Μέσος Χρόνος Μετακίνησης

Ο σχεδιασμός των γραμμών του δικτύου, δηλαδή η αλληλουχία στάσεων, παρουσιάζεται στον πίνακα 6.3.2:

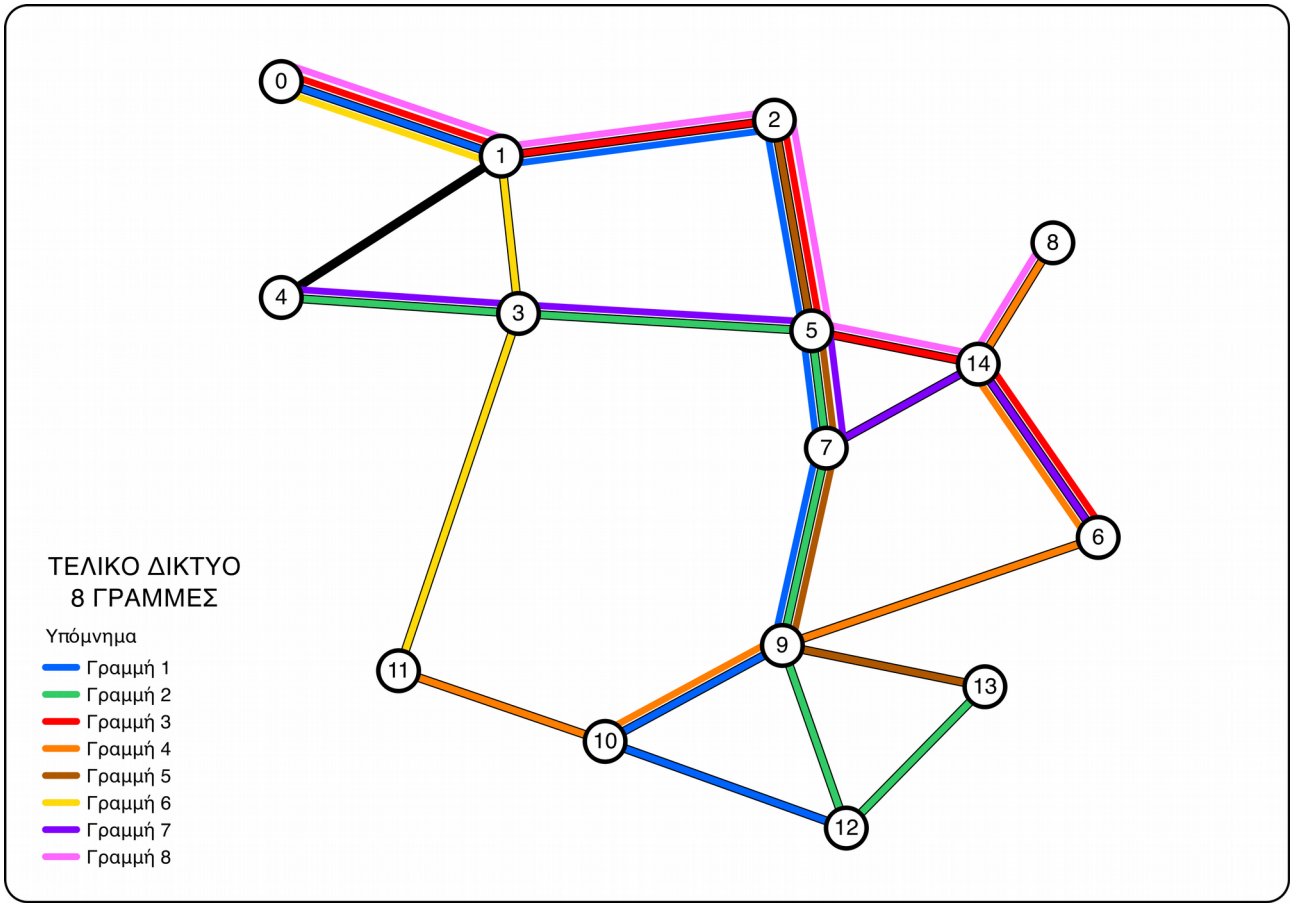
1:	0	1	2	5	7	9	10	12
2:	4	3	5	7	9	12	13	
3:	0	1	2	5	14	6		
4:	8	14	6	9	10	11		
5:	2	5	7	9	13			
6:	0	1	3	11				
7:	4	3	5	7	14	6		
8:	0	1	2	5	14	8		

Πίν. 6.3.2. Η μορφή του τελικού δικτύου

Για συνολική εποπτεία του δικτύου, στα Διαγ. 6.3.2, 6.3.3 παρουσιάζονται το αρχικό και το βελτιστοποιημένο δίκτυο, αντίστοιχα.



Διάγ. 6.3.2. Το αρχικό δίκτυο 8 γραμμών



Διάγ. 6.3.3. Το τελικό δίκτυο 8 γραμμών

Τα λειτουργικά στοιχεία των γραμμών του τελικού δικτύου παρουσιάζονται στον πίνακα 6.3.3, ενώ στον πίνακα 6.3.4 παρουσιάζονται οι φορτίσεις ανά σύνδεσμο για κάθε γραμμή, με βάση την εξυπηρετούμενη ζήτηση.

	Χρ. κύκλου (min)	Συχνότητα (veh/h)	Αρ. οχημάτων (veh)	Τύπος οχήματος (N,A)	Μέγ. Μεταφορική ικανότητα (pas/h)
1	33	14	17	A	2100
2	30	12	14	A	1800
3	18	11	8	N	880
4	32	9	11	A	1350
5	21	7	6	A	1050
6	21	10	8	N	800
7	14	7	4	N	560
8	24	7	7	N	560

Πίν. 6.3.3. Λειτουργικά στοιχεία του τελικού δικτύου

1	0	1	2	5	7	9	10	12
	1032	1516	1632	2100	2038	1660	1006	
2	4	3	5	7	9	12	13	
	578	1160	1548	1698	570	130		
3	0	1	2	5	14	6		
	582	746	848	710	710			
4	8	14	6	9	10	11		
	374	360	1328	1264	820			
5	2	5	7	9	13			
	262	800	962	450				
6	0	1	3	11				
	530	726	214					
7	4	3	5	7	14	6		
	366	514	302	278	250			
8	0	1	2	5	14	8		
	492	506	458	228	242			

Πίν 6.3.4. Φορτίσεις ανά γραμμή ανά σύνδεσμο

6.3.3. Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων

Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιείται για να περιγραφεί ποιοτικά ο τρόπος που επηρεάζει κάθε παράμετρος τα αποτελέσματα του προγράμματος. Για να πραγματοποιηθεί αυτό επιλέχθηκαν οι βασικότερες παράμετροι του γενετικού αλγορίθμου, οι οποίες αυξήθηκαν και μειώθηκαν κατά ένα ποσό ανάλογο με την τάξη μεγέθους. Στη συνέχεια, με τις παραμέτρους τροποποιημένες κατά μία κάθε φορά επαναλήφθηκε η επίλυση του προγράμματος και καταγράφησαν τα αποτελέσματα. Οι μεταβλητές που επιλέχθηκαν για την ανάλυση ευαισθησίας, καθώς και οι μεταβολές τους είναι οι εξής:

- popN, eliteN (+8 και για τα δύο ταυτόχρονα, έτσι ώστε να μείνει σταθερός ο αριθμός νέων ατόμων). Λόγω μικρού πληθυσμού στη βέλτιστη λύση, επιλέχθηκε να μην πραγματοποιηθεί ανάλυση ευαισθησίας για μικρότερο δείγμα πληθυσμού
- p_{ms} (± 0,1)
- p_{del} (± 0,1)

Για πρακτικούς λόγους, η σύγκριση πραγματοποιείται για την αξιολόγηση του συνόλου των χρηστών. Αναλυτικά αποτελέσματα επισυνάπτονται στο παράρτημα. Στον πίνακα 6.3.5 απεικονίζονται οι μεταβολές στα αποτελέσματα του προγράμματος.

	Αρχ.	**Τελ.**	**PopN + 4**	**P_{ms} + 0,1**	**P_{ms} – 0,1**	**P_{del} + 0,1**	**P_{del} – 0,1**
ATT	11,65	10,35	10,63	10,50	10,40	10,49	10,37
d_0	86,58	94,16	93,32	93,64	93,51	93,71	94,09
d_1	13,42	5,84	6,49	6,36	6,49	6,29	5,91
d_2	0,00	0,00	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00
d_{un}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Πίν. 6.3.5. Μεταβολές στα αποτελέσματα από την ανάλυση ευαισθησίας

Η επιρροή των παραμέτρων στα αποτελέσματα θα αναλυθούν συνολικά για όλες τις κατηγορίες δικτύων στο Κεφ. 6.4. Αξίζει να αναφερθεί ότι, ομοίως με την προηγούμενη περίπτωση, οι παράμετροι p_{ms} και p_{del} επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό την ποιότητα των παραγόμενων λύσεων, σε σχέση με την μεταβολή του πληθυσμού.

6.4. Ανάλυση αποτελεσμάτων

6.4.1. Ανάλυση αποτελεσμάτων επίλυσης

Όπως περιγράφηκε αναλυτικά παραπάνω, η επίλυση πραγματοποιήθηκε για δίκτυα 6, 7 και 8 γραμμών. Η επίλυση για αυτές τις τρεις κατηγορίες έδωσε τη δυνατότητα εξαγωγής σημαντικών συμπερασμάτων σχετικά με τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε κατηγορία. Για την σύγκριση αυτή θεωρείται ως μέση περίπτωση αυτή της επίλυσης δικτύου 7 γραμμών, ενώ οι άλλες δύο κατηγορίες αποτελούν συγκριτικές αυτής.

Κατά την επίλυση δικτύου 6 γραμμών παρατηρήθηκε ότι οι επιλογή παραμέτρων για τη βέλτιστη λύση διαφέρει σε αυτή των 7 γραμμών στα μεγέθη p_{ms} και p_{del}. Πιο συγκεκριμένα, και οι δύο παράμετροι ήταν αυξημένες κατά 0,1 στην περίπτωση των 6 γραμμών. Η πιο πιθανή δικαιολογία για τις δύο αυτές μεταβολές είναι η ανελαστικότητα της ύπαρξης μικρού αριθμού γραμμών. Στην περίπτωση μικρότερου δικτύου η πιθανότητα της ικανοποίησης της ζήτησης για ένα ζεύγος προέλευσης – προορισμού με άνω της μίας εναλλακτικές είναι μικρότερη. Επομένως, η ποιότητα του μικρού δικτύου είναι αρκετά ευαίσθητη σε μεγάλες μεταβολές, άρα και η τιμή p_{ms} πρέπει να είναι υψηλή. Για να αποφευχθεί, όμως, ο εγκλωβισμός σε τοπικό βέλτιστο, είναι απαραίτητο να βρεθεί εναλλακτική απεγκλωβισμού. Για το λόγο αυτό η τιμή της παραμέτρου p_{del} είναι αυξημένη, έτσι ώστε να ενισχύσει την ποικιλία ατόμων στον πληθυσμό.

Στην περίπτωση επίλυσης δικτύου 8 γραμμών παρατηρήθηκε ότι η βέλτιστη λύση πραγματοποιήθηκε με μικρότερο πληθυσμό σε σχέση με την περίπτωση των 7 γραμμών, δηλαδή οι τιμές popN kai eliteN ήταν μειωμένες κατά 4 άτομα. Δεδομένης της φύσης του προβλήματος και του τρόπου με τον οποίο αναζητούνται νέες υποψήφιες λύσεις με τον γενετικό αλγόριθμο, δε μπορεί να υπάρξει σίγουρο συμπέρασμα για τη διαφορά αυτή. Πολύ πιθανόν να οφείλεται σε απλό τυχαίο γεγονός. Όμως, μια λογική εξήγηση θα μπορούσε να ήταν ο περιορισμός του χώρου λύσεων, δεδομένου ότι ο μεγάλος αριθμός γραμμών σε συνδυασμό με μεγάλο πληθυσμό μπορεί να παρουσιάσει υπερβολικά έντονη ποικιλομορφία, η οποία δεν είναι επιθυμητή, διότι δεν αυξάνει την πιθανότητα εξεύρεσης καλύτερων λύσεων, ενώ ταυτόχρονα επιδεινώνει τον χρόνο επίλυσης, ο οποίος είναι ήδη επιβαρυμένος από την ύπαρξη μεγαλύτερου αριθμού γραμμών στο δίκτυο. Παρόλα αυτά, το συγκεκριμένο συμπέρασμα αποτελεί υπόθεση και δεν αποκλείει την εξεύρεση καλύτερης λύσης με μεγαλύτερο πληθυσμό.

Συνολικά, παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος λειτουργεί ικανοποιητικά στην παραγωγή νέων καλύτερων λύσεων, ενώ θετικό σημάδι αποτελεί τόσο το γεγονός ότι τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά και για τις δύο κατηγορίες μετακινούμενων, αποδεικνύοντας ότι στους δέσμιους χρήστες παρέχεται ποιοτική και γρήγορη μετακίνηση όμοια με το σύνολο των μετακινούμενων, όσο και η συμβατότητα των αποτελεσμάτων με την τρέχουσα βιβλιογραφία.

6.4.2. Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας

Με την ανάλυση ευαισθησίας των επιλεγμένων παραμέτρων μπορούν να εξαχθούν αρκετά συμπεράσματα για τη λειτουργία των παραμέτρων και τον τρόπο που επηρεάζουν την εξεύρεση της βέλτιστης λύσης.

Η αυξομείωση του πληθυσμού συμπεριφέρθηκε διαφορετικά σε κάθε περίπτωση. Αυτό συνέβη διότι είναι η μόνη παράμετρος που δεν επηρεάζει την ποιότητα της λύσης, αλλά την εξεύρεση νέων ατόμων. Δεδομένου ότι ο αριθμός επαναλήψεων είναι σταθερός, είναι πολύ πιθανό να έχουν αντίστροφη σχέση με το μέγεθος πληθυσμού, δηλαδή σε έναν μεγάλο πληθυσμό να υπάρχει δυνατότητα εξεύρεσης λύσης πιο γρήγορα, ενώ σε έναν μικρότερο να χρειάζονται περισσότερες επαναλήψεις, προκειμένου να βρεθεί η ίδια λύση.

Η μεταβολή της παραμέτρου μικρής τροποποίησης p_{ms} είχε τη δυνατότητα να μεταβάλει την ελαστικότητα τροποποίησης του δικτύου, μέσω της πιθανότητας πραγματοποίησης μεγάλης τροποποίησης (big mod), η οποία οδηγεί σε μεγάλη ποικιλομορφία και βοηθά στον απεγκλωβισμό από τοπικά μέγιστα. Και στις δύο περιπτώσεις η μεταβολή του p_{ms} αύξησε τους μέσους χρόνους ανά επιβάτη, όμως τα ενδιαφέροντα συμπεράσματα απορρέουν από τη σύγκριση μεταξύ των κατηγοριών δικτύων. Πιο συγκεκριμένα, φάνηκε ότι οι διαφορές στις δύο συγκριτικές επιλύσεις (αύξηση και μείωση της παραμέτρου) είναι μικρότερες στην περίπτωση του δικτύου 6 γραμμών και μεγαλύτερες στην περίπτωση του δικτύου 8 γραμμών. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι τα δίκτυα με μικρότερο αριθμό γραμμών είναι πιο “ευάλωτα” σε τροποποιήσεις, άρα και οι μεγάλες τροποποιήσεις είναι πολύ πιο εύκολο να απορριφθούν λόγω πολύ υψηλότερου κόστους. Επομένως, σε μικρά δίκτυα οι λύσεις με μικρές τροποποιήσεις είναι τελικά περισσότερο αποδεκτές. Αντίθετα, στην περίπτωση των μεγάλων δικτύων υπάρχει μεγαλύτερη ποικιλία επιλογών, επομένως οι μεγάλες τροποποιήσεις “υποστηρίζονται” ευκολότερα από το υπόλοιπο δίκτυο, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται ποικιλομορφία η οποία ευνοεί την εμφάνιση καλύτερων λύσεων.

Με τον ίδιο περίπου τρόπο με την παράμετρο p_{ms} επηρεάζει τις λύσεις και η μεταβολή της παραμέτρου διαγραφής κόμβου p_{del}. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση δικτύου με μικρό αριθμό γραμμών, η διαγραφή ενός κόμβου μπορεί να αποτελέσει διαγραφή του συνολικά από το δίκτυο, με αποτέλεσμα τη μη εξυπηρέτηση των επιβατών του συγκεκριμένου κόμβου, άρα και απειρισμό του μέσου χρόνου μετακίνησης, εφόσον υπάρχει ο αυστηρός περιορισμός ικανοποίησης του συνόλου της ζήτησης. Τα δίκτυα, επομένως, τα οποία επηρεάζονται από αυτή την παράμετρο αποκλείονται από τη διαδικασία του γενετικού αλγορίθμου και, επομένως, η επιρροή της παραμέτρου αυτής στα υποψήφια δίκτυα είναι μικρή. Το αντίθετο συμβαίνει σε μεγαλύτερα δίκτυα, όπως στην περίπτωση των 8 γραμμών όπου, λόγω της μεγάλης ποικιλίας και μικρότερης πιθανότητας διέλευσης μόνο μίας γραμμής από έναν κόμβο, έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει μεγάλες διαφορές στις υποψήφιες λύσεις.

Είναι ξεκάθαρο ότι σε κάθε περίπτωση ελήφθησαν υπόψη τα καλύτερα αποτελέσματα, επομένως στην ανάλυση ευαισθησίας κάθε αλλαγή της παραμέτρου οδήγησε σε χειρότερα. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι, λόγω της φύσης του γενετικού αλγορίθμου, ο οποίος συνδυάζει σε κάθε γενιά πλήθος τυχαίων μεταβλητών, τροποποιήσεων και διασταυρώσεων, υπάρχει περίπτωση ένας διαφορετικός συνδυασμός παραμέτρων, ή ακόμα και κάποιος από τους υφιστάμενους, να καταλήξει σε καλύτερα αποτελέσματα από αυτά που παρουσιάζονται. Το γεγονός αυτό μπορεί να αλλάξει σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα της κάθε περίπτωσης. Το μοναδικό στοιχείο που μπορεί να εγγυηθεί τη μεγάλη πιθανότητα (αλλά όχι βεβαιότητα) της επιλογής των σωστών παραμέτρων, καθώς και της επιρροής τους στην αναζήτηση λύσης, είναι η ύπαρξη λογικής ερμηνείας αυτής της συμπεριφοράς. Σε κάθε περίπτωση μπορούν να πραγματοποιηθούν πολύ περισσότερα πειράματα πάνω σε αυτό και τα αποτελέσματα, όπως και η επιρροή των παραμέτρων, να αναλυθούν και να ερμηνευθούν στατιστικά με μεγαλύτερη βεβαιότητα μέσω σύγκλισης των αποτελεσμάτων, κάτι που όμως απαιτεί πολύ χρόνο και βρίσκεται εκτός των ορίων της συγκεκριμένης εργασίας.

7. Επίλογος

7.1. Ανασκόπηση του προβλήματος

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε αναλυτικά το πρόβλημα σχεδιασμού δικτύου αστικών συγκοινωνιών και μία προσέγγιση επίλυσής του. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρθηκε το ιστορικό πλαίσιο των ερευνών στην προσέγγιση της επίλυσής του, αναλύθηκε η δομή του και ο λόγος για τον οποίο παρουσιάζεται τόσο μεγάλη περιπλοκότητα στην προσπάθεια επίλυσης. Εξετάστηκαν οι διαφορετικές προσεγγίσεις και παρουσιάστηκε μία νέα η οποία, βασιζόμενη στις προηγούμενες, διαφέρει στο γεγονός ότι λαμβάνει υπόψη της κοινωνικά κριτήρια και πολιτικές, μέσω των οποίων δημιουργούνται οι βάσεις για την υλοποίηση ενός δικτύου με κοινωνικό πρόσημο, χωρίς όμως να αυτό να οδηγείται σε ακριβές λύσεις, τόσο για τους επιβάτες, όσο και για τους φορείς. Πρώτα απ' όλα, ο σχεδιασμός αρχικοποιείται με βάση τους δέσμιους χρήστες, αυτούς δηλαδή που έχουν μεγαλύτερη ανάγκη από ένα τέτοιο δίκτυο, και στη συνέχεια βελτιστοποιείται με κριτήρια ισότητας στη μετακίνηση και λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των μετακινούμενων ενός δικτύου, ανεξάρτητα από την επιλογή μέσου. Το παραγόμενο δίκτυο αποτελεί τη βάση για την εξυπηρέτηση των δέσμιων χρηστών, όμως ταυτόχρονα παρέχει δυνατότητα μετακίνησης με κριτήρια ισότητας σε όλους τους πολίτες, με αποτέλεσμα να προωθεί αποτελεσματικά τη βιώσιμη κινητικότητα και την ενότητα μεταξύ των μετακινούμενων. Σε μία περίοδο που η βιώσιμη κινητικότητα και η προώθηση των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς αποτελεί προτεραιότητα του αστικού σχεδιασμού, η συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζει μία λογική σχεδιασμού που την προωθεί ξεκάθαρα, χωρίς όμως να κάνει διακρίσεις μεταξύ των κοινωνικών ομάδων, και παρέχει δυνατότητα μετακίνησης σε όλους τους πολίτες ανεξάρτητα από την υφιστάμενη επιλογή μέσου.

7.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Για την καλύτερη δομή των προτάσεων, αυτές κατηγοριοποιούνται με βάση το επίπεδο επέμβασής τους, έτσι ώστε να διαχωριστούν σε προτάσεις που αφορούν την πολιτική και τη λογική επίλυσης του προβλήματος και προτάσεις που σχετίζονται με το τεχνικό κομμάτι του προγράμματος και της διαδικασίας επίλυσης.

7.2.1. Προτάσεις σχετικά με τη λογική επίλυσης του προβλήματος

Η βασική αρχή, και ταυτόχρονα μοναδικότητα της συγκεκριμένης εργασίας, είναι ο διαχωρισμός των μετακινούμενων σε δέσμιους και μη, με αποτέλεσμα τη χρήση των πρώτων για τη δημιουργία του δικτύου και του συνόλου για τη βελτιστοποίησή του. Η έρευνα σχετικά με την αποδοτικότητα της συγκεκριμένης προσέγγισης μπορεί να συνεχιστεί με τους εξής τρόπους:

- Εφαρμογή της λογικής αυτής σε ένα μεγαλύτερο δίκτυο, στο οποίο τα δεδομένα των δέσμιων χρηστών είναι διαθέσιμα και ταυτόχρονα υπάρχει ποιοτική προσέγγιση αυτής της κατηγορίας μετακινούμενων, έτσι ώστε να μπορέσει να ελεγχθεί αν όντως η συγκεκριμένη προσέγγιση βρίσκεται πιο κοντά στην πραγματικότητα και τα αποτελέσματά της προσεγγίζουν καλύτερα τις ανάγκες του δικτύου αυτού.
- Εφαρμογή διαφορετικών κριτηρίων επιλογής μέσου για κάθε κατηγορία μετακινούμενων: Δεδομένου ότι οι δέσμιοι χρήστες δεν έχουν άλλη εναλλακτική μετακίνησης, ενώ οι μη δέσμιοι έχουν περισσότερες, μπορεί να ελεγχθεί η χρήση διαφορετικών κριτηρίων για την επιλογή μέσου, όπως για παράδειγμα ο μέγιστος αριθμός μετεπιβιβάσεων ή η χρονική απόκλιση από τη συντομότερη διαδρομή.
- Η κατηγορία των δέσμιων χρηστών μπορεί να είναι μια οποιαδήποτε κατηγορία χρηστών που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο φορέας που πρόκειται να κάνει σχεδιασμό δικτύου. Για παράδειγμα, σε περίπτωση ύπαρξης υφιστάμενου δικτύου, γεγονός που ισχύει στην πλειοψηφία των πραγματικών περιπτώσεων, μπορούν να θεωρηθούν ως δέσμιοι χρήστες οι υφιστάμενοι χρήστες των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς, επομένως μπορεί να δημιουργηθεί δίκτυο που να βασίζεται στην εξυπηρέτηση των υφιστάμενων χρηστών και να βελτιστοποιηθεί με βάση τις συνολικές μετακινήσεις της περιοχής, έτσι ώστε να διατηρήσει την υφιστάμενη εξυπηρέτηση των χρηστών και ταυτόχρονα να δημιουργήσει προϋποθέσεις ελκυστικότητας του δικτύου για τους χρήστες άλλων μέσων. Σε αυτό φαίνεται καλύτερα και η διαφορά της παρούσας προσέγγισης σε αντίθεση με τις υπάρχουσες, οι οποίες προσπαθούν να εξυπηρετήσουν το σύνολο των υφιστάμενων χρηστών με τον καλύτερο τρόπο, αγνοώντας όμως τους υπόλοιπους μετακινούμενους, άρα και κάθε προσπάθεια προσέγγισής τους στο δίκτυο των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς, μειώνοντας την προώθηση της βιώσιμης κινητικό-τητας.

7.2.2. Προτάσεις σχετικά με το τεχνικό τμήμα του προβλήματος

Μελλοντική έρευνα μπορεί να πραγματοποιηθεί και με αξιοποίηση της λογικής που παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία, σε συνδυασμό με μεθόδους και τεχνικές που έχουν ήδη αναπτυχθεί στη βιβλιογραφία. Οι τομείς στους οποίους μπορεί να πραγματοποιηθεί περαιτέρω έρευνα είναι οι εξής:

- Οι σειρά των διαδικασιών μπορεί να διαφέρει: Η συγκεκριμένη προσέγγιση περιλαμβάνει αρχικό σχεδιασμό του δικτύου με βάση τους δέσμιους χρήστες και βελτιστοποίησή του για το σύνολο των μετακινούμενων. Εναλλακτικά, μπορούν οι διαδικασίες αυτές να αντιστραφούν, ενώ ταυτόχρονα μπορούν να προστεθούν γενετικοί αλγόριθμοι στη διαδικασία για περαιτέρω βελτίωση του αποτελέσματος, όπως με την δημιουργία αρχικού δικτύου για το σύνολο των μετακινούμενων, βελτιστοποίηση αρχικά για τους δέσμιους χρήστες και βελτιστοποίηση στη συνέχεια για το σύνολο των μετακινούμενων.
- Βελτιωμένες μέθοδοι: Η συγκεκριμένη λογική μπορεί να πραγματοποιηθεί και με άλλες μεθόδους, όπως για παράδειγμα με χρήση διαφορετικού αλγορίθμου συντομότερης διαδρομής από αυτού του Dijkstra.
- Βελτιωμένες τεχνικές στον γενετικό αλγόριθμο: Η διαδικασία του γενετικού αλγορίθμου μπορεί να βελτιωθεί με χρήση διαφορετικών μεθόδων διασταύρωσης, μετάλλαξης, ακόμα και με τροποποιήσεις στην ίδια τη δομή του γενετικού αλγορίθμου.
- Ένταξη του υπολογισμού οχημάτων στην αντικειμενική συνάρτηση και τον γενετικό αλγόριθμο και χρήση ορίου, έτσι ώστε ο σχεδιασμός να πραγματοποιείται ταυτόχρονα με τον υπολογισμό των απαιτούμενων οχημάτων, ενώ ταυτόχρονα να οριοθετείται η εξυπηρέτηση των χρηστών με βάση τις δυνατότητες του οργανισμού λειτουργίας (operator) της περιοχής στην οποία πραγματοποιείται ο σχεδιασμός.
- Χρήση δυναμικού προσδιορισμού χρόνων διαδρομής, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να ανταποκρίνονται περισσότερο στην πραγματικότητα. Επιπρόσθετα, μπορούν να υπολογίζονται οι διαφορές στους χρόνους διαδρομής με βάση τους επιβάτες που εισέρχονται στο δίκτυο των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς και έτσι να αναλυθούν τα οφέλη της προσέλκυσης νέων επιβατών στην κυκλοφοριακή ανάλυση των συνδέσμων.

8. Βιβλιογραφία

- Καρλαύτης Μ., Λυμπέρης Κ.: Συστήματα Αστικών Συγκοινωνιών – Σχεδιασμός, Μελέτη, Λειτουργία – Αθήνα, 2009
- Πραστάκος Γ.: Διοικητική Επιστήμη – Αθήνα, 2006
- Γεωργόπουλος Ε., Λυκοθανάσης Σ.: Εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγορίθμους – Πάτρα, 1999
- Mandl C.: Evaluation and Optimization of urban public transportation networks – 1979
- Marin A., Jaramillo P.: Urban rapid transit network capacity extension – 2007
- Mauttone A., Urquhart M.: A multi-objective metaheuristic approach for the Transit Network Design Problem – 2009
- Curtin K., Biba S.: The Transit Route Arc-Node Service Maximization problem – 2010
- Fan L., Mumford C.: A metaheuristic approach to the Urban Transit Routing Problem – 2010
- Černá A. et al.: Bus Route Design in small demand areas – 2011
- Estrada M. et al.: Design and implementation of efficient transit networks: Procedure, case study and validity test – 2011
- Euchi J., Mraihi R.: The urban bus routing problem in the Tunisian case by the hybrid artificial ant colony algorithm – 2012
- Roca-Riu M., Estrada M.: The design of interurban bus networks in city centers – 2012
- Nikolic´ M., Teodorovic´ D.: Transit network design by Bee Colony Optimization – 2013
- Nayeem M. et al.: Transit network design by genetic algorithm with elitism – 2014
- Amiripour M. et al.: Optimal Modification of Urban Bus Network Routes Using a Genetic Algorithm – 2014
- Pternea M. et al.: Sustainable urban transit network design – 2015
- Ferguson M. et al.: Incorporating equity into the transit frequency-setting problem – 2011

- Gallo M. et al.: The transit network design problem with elastic demand and internalisation of external costs: An application to rail frequency optimisation – 2011
- Torres M. et al.: Line planning on tree networks with applications to the Quito Trolebu´s system – 2011
- Fan W.: Tabu Search Strategies for the Public Transportation Network Optimizations with Variable Transit Demand – 2008
- Zhao F., Zeng X.: Optimization of transit route network, vehicle headways and timetables for large-scale transit networks – 2008
- Shinamoto H. et al.: Evaluation of an existing bus network using a transit network optimisation model: a case study of the Hiroshima City Bus network – 2010
- Blum J., Mathew T.: Intelligent Agent Optimization of Urban Bus Transit System Design – 2011
- Han J. et al.: Metaheuristic algorithms for a Transit Route Design – 2011
- Szeto W.Y., Wu Y.: A simultaneous bus route design and frequency setting problem for Tin Shui Wai, Hong Kong – 2011
- Yu B. et al.: Transit route network design-maximizing direct and transfer demand density – 2012
- Shafani Y., Khani A.: A practical model for transfer optimization in a transit network: Model formulations and solutions – 2010
- Kepaptsoglou K., Karlaftis M.: Transit Route Network Design Problem: Review – 2009
- Schöbel A.: Line planning in public transportation: models and methods – 2011
- Farahani R.Z. et al.: A review of urban transportation network design problems
- Chakroborty P., Wivedi T.: Optimal Route Network Design for Transit Systems Using Genetic Algorithms – 2002
- Zhao F., Ubaka I., Gan A.: Transit Network Optimization: Minimizing Transfers and Maximizing Service Coverage with an Integrated Simulated Annealing and Tabu Search Method – 2005
- Fan W., Machemehl R.: Optimal Transit Route Network Design Problem with Variable Transit Demand: Genetic Algorithm Approach – 2006
- Zhao F., Zeng X.: Simulated Annealing–Genetic Algorithm for Transit Network Optimization – 2006
- Fan W., Machemehl R.: Using a Simulated Annealing Algorithm to Solve the Transit Route Network Design Problem – 2006

- Zhao F., Zeng X.: Optimization of transit network layout and headway with a combined genetic algorithm and simulated annealing method – 2006
- Zhao F., Zeng X.: Optimization of User and Operator Cost for Large-Scale Transit Network – 2007
- Cipriani E. et al.: Transit network design: A procedure and an application to a large urban area – 2010
- Kepaptsoglou K., Karlaftis M.: The bus bridging problem in metro operations: conceptual framework, models and algorithms – 2010
- Ciaffi F., Cipriani E.: Feeder bus network design problem: a new metaheuristic procedure and real size applications – 2012
- Wang H. et al.: Sustainable Transportation Network Design with Stochastic Demands and Chance Constraints – 2012
- Owais M. et al.: Optimal circular bus routes planning for Transit Network Design Problem in urban areas – 2013
- Amiripour S.M. et al.: Hybrid Method for Bus Network Design with High Seasonal Demand Variation – 2014
- Klier M., Haase K.: Urban public transit network optimization with flexible demand – 2014
- Moussa G., Owais M.: A Novel Solution Methodology for Transit Route Network Design Problem – 2014
- Ulusoy Y. et al.: Optimal bus service patterns and frequencies considering transfer demand elasticity with genetic algorithm – 2015
- www.wikipedia.org
- www.python.org
- www.jetbrains.com

Παράρτημα

Αρχείο αποτελεσμάτων δικτύου 6 γραμμών

```
==========================================================================================================

Main Data:
6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer
----------------------------------------------------------------------------------------------------------
Initial Route Set:
Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 11]
Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12]
Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]
Line 4: [8, 14, 6, 9, 10]
Line 5: [5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

Captive users' score:
d0: 86.48%, d1: 13.15%, d2: 0.38%, dun: 0.0%, ATT: 11.8 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [368, 456, 484, 664, 704, 246]
Line 2: [290, 644, 786, 866, 192]
Line 3: [220, 302, 370, 406, 342]
Line 4: [124, 60, 190, 170]
Line 5: [112, 348, 410, 218]
Line 6: [108, 206, 270]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720
Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 12, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880
Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480
Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240
Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480
Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

All users' score:
d0: 84.46%, d1: 14.96%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.79 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [1194, 1850, 1890, 2222, 2064, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2424, 2450, 1612]
Line 3: [842, 1100, 1172, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [310, 864, 968, 574]
Line 6: [596, 910, 1040]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250
Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 17, No. of vehicles: 18, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2550
Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350
Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350
Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050
Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050
----------------------------------------------------------------------------------------------------------
Genetic algorithm data:

Population Size: 20, Elite Size: 8, No of iterations: 150
Objective function: minZ = 2*ATT*dtotal + 5*d1*dtotal + 10*d2*dtotal + 50*ATT*dun*dtotal
Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4
----------------------------------------------------------------------------------------------------------
Final Route Set:
Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 12]
Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12, 13]
Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]
Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 11]
Line 5: [8, 14, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

Captive users' score:
d0: 93.0%, d1: 7.0%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.58 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [386, 442, 554, 698, 708, 256, 154]
Line 2: [292, 454, 578, 652, 36, 32]
Line 3: [208, 280, 370, 346, 334]
Line 4: [68, 64, 196, 298, 234]
Line 5: [50, 50, 310, 400, 186]
Line 6: [108, 166, 36]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720
Line 2: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720
Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400
Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320
Line 5: Route duration (m): 29, Frequency (veh/h): 5.0, No. of vehicles: 6, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400.0
Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

All users' score:
d0: 91.91%, d1: 8.09%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.48 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [1230, 1756, 2038, 2274, 2076, 1660, 1006]
Line 2: [960, 1700, 1706, 1722, 570, 130]
Line 3: [808, 1022, 1162, 972, 940]
Line 4: [386, 380, 1328, 1276, 820]
Line 5: [218, 232, 770, 920, 456]
Line 6: [596, 730, 220]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 16, No. of vehicles: 20, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2400
Line 2: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 14, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1800
Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350
Line 5: Route duration (m): 29, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 13, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 960
```

```
Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 800

==========================================================================================================

Main Data:
6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer
----------------------------------------------------------------------------------------------------------
Initial Route Set:
Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10]
Line 2: [1, 3, 5, 7, 9, 12]
Line 3: [1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 4: [8, 14, 6, 9, 10]
Line 5: [2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 2, 5, 14]

Captive users' score:
d0: 86.48%, d1: 13.15%, d2: 0.38%, dun: 0.0%, ATT: 11.8 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [368, 456, 484, 664, 704, 246]
Line 2: [290, 644, 786, 866, 192]
Line 3: [220, 302, 370, 406, 342]
Line 4: [124, 60, 190, 170]
Line 5: [112, 348, 410, 218]
Line 6: [108, 206, 270]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720
Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 12, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880
Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480
Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240
Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480
Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

All users' score:
d0: 84.46%, d1: 14.96%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.79 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [1194, 1850, 1890, 2222, 2064, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2424, 2450, 1612]
Line 3: [842, 1100, 1172, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [310, 864, 968, 574]
Line 6: [596, 910, 1040]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250
Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 17, No. of vehicles: 18, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2550
Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350
Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350
Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050
Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050
----------------------------------------------------------------------------------------------------------
Genetic algorithm data:

Population Size: 24, Elite Size: 12, No of iterations: 150
Objective function: minZ = 2*ATT*dtotal + 5*d1*dtotal + 10*d2*dtotal + 50*ATT*dun*dtotal
Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4
----------------------------------------------------------------------------------------------------------
Final Route Set:
Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 12]
Line 2: [0, 1, 3, 5, 7, 9, 12, 13]
Line 3: [4, 1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 11]
Line 5: [4, 3, 5, 7, 9, 10, 11]
Line 6: [0, 1, 2, 5, 14, 6]

Captive users' score:
d0: 93.8%, d1: 5.82%, d2: 0.38%, dun: 0.0%, ATT: 10.69 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [390, 396, 426, 542, 558, 186, 152]
Line 2: [74, 106, 128, 306, 374, 34, 32]
Line 3: [66, 76, 150, 294, 324, 188]
Line 4: [124, 60, 196, 190, 118]
Line 5: [226, 322, 460, 532, 204, 136]
Line 6: [224, 272, 340, 398, 334]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 9, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560
Line 2: Route duration (m): 37, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400
Line 3: Route duration (m): 29, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 6, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400
Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240
Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 9, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560
Line 6: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400

All users' score:
d0: 93.26%, d1: 6.23%, d2: 0.51%, dun: 0.0%, ATT: 10.63 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [1304, 1444, 1500, 1698, 1546, 1286, 1006]
Line 2: [438, 438, 484, 854, 954, 560, 130]
Line 3: [316, 528, 614, 914, 884, 460]
Line 4: [612, 360, 1328, 802, 436]
Line 5: [630, 1114, 1402, 1502, 1018, 554]
Line 6: [884, 954, 1026, 1208, 956]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1800
Line 2: Route duration (m): 37, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 17, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 960
Line 3: Route duration (m): 29, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 13, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 960
Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350
Line 5: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 14, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1650
Line 6: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

==========================================================================================================
```

```
Main Data:
6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------
Initial Route Set:
Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 12]
Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12, 13]
Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]
Line 4: [3, 5, 7, 9, 10]
Line 5: [3, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

Captive users' score:
d0: 86.48%, d1: 13.15%, d2: 0.38%, dun: 0.0%, ATT: 11.8 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [368, 456, 484, 664, 704, 246]
Line 2: [290, 644, 786, 866, 192]
Line 3: [220, 302, 370, 406, 342]
Line 4: [124, 60, 190, 170]
Line 5: [112, 348, 410, 218]
Line 6: [108, 206, 270]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720
Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 12, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880
Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480
Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240
Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480
Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

All users' score:
d0: 84.46%, d1: 14.96%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.79 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [1194, 1850, 1890, 2222, 2064, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2424, 2450, 1612]
Line 3: [842, 1100, 1172, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [310, 864, 968, 574]
Line 6: [596, 910, 1040]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250
Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 17, No. of vehicles: 18, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2550
Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350
Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350
Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050
Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------
Genetic algorithm data:

Population Size: 16, Elite Size: 4, No of iterations: 150
Objective function: minZ = 2*ATT*dtotal + 5*d1*dtotal + 10*d2*dtotal + 50*ATT*dun*dtotal
Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------
Final Route Set:
Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 12]
Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12, 13]
Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]
Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 11]
Line 5: [8, 14, 5, 3, 11]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

Captive users' score:
d0: 92.86%, d1: 7.14%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.76 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [386, 442, 554, 854, 910, 256, 154]
Line 2: [290, 390, 734, 856, 222, 218]
Line 3: [208, 280, 370, 330, 324]
Line 4: [68, 70, 196, 298, 234]
Line 5: [48, 60, 58, 12]
Line 6: [108, 166, 22]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 15, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 960
Line 2: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 13, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880
Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400
Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320
Line 5: Route duration (m): 25, Frequency (veh/h): 1, No. of vehicles: 1, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 80
Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

All users' score:
d0: 92.1%, d1: 7.9%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.59 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [1230, 1758, 2042, 2666, 2530, 1668, 1010]
Line 2: [958, 1426, 2086, 2198, 1026, 590]
Line 3: [808, 1022, 1162, 960, 932]
Line 4: [376, 374, 1318, 1262, 810]
Line 5: [226, 248, 276, 90]
Line 6: [596, 730, 132]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 18, No. of vehicles: 22, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2700
Line 2: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 17, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250
Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350
Line 5: Route duration (m): 25, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320
Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 800

===========================================================================================================

Main Data:
6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------
Initial Route Set:
```

```
Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 12]
Line 2: [4, 3, 5, 7, 9]
Line 3: [4, 1, 2, 5, 14, 7]
Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 11]
Line 5: [2, 5, 7, 9]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

Captive users' score:
d0: 86.48%, d1: 13.15%, d2: 0.38%, dun: 0.0%, ATT: 11.8 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [368, 456, 484, 664, 704, 246]
Line 2: [290, 644, 786, 866, 192]
Line 3: [220, 302, 370, 406, 342]
Line 4: [124, 60, 190, 170]
Line 5: [112, 348, 410, 218]
Line 6: [108, 206, 270]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720
Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 12, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880
Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480
Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240
Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480
Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

All users' score:
d0: 84.46%, d1: 14.96%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.79 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [1194, 1850, 1890, 2222, 2064, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2424, 2450, 1612]
Line 3: [842, 1100, 1172, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [310, 864, 968, 574]
Line 6: [596, 910, 1040]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250
Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 17, No. of vehicles: 18, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2550
Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350
Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350
Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050
Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------
Genetic algorithm data:

Population Size: 20, Elite Size: 8, No of iterations: 150
Objective function: minZ = 2*ATT*dtotal + 5*d1*dtotal + 10*d2*dtotal + 50*ATT*dun*dtotal
Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 1.0, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------
Final Route Set:
Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 12]
Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12, 13]
Line 3: [4, 1, 2, 5, 14, 6]
Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 11]
Line 5: [2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

Captive users' score:
d0: 92.58%, d1: 6.57%, d2: 0.85%, dun: 0.0%, ATT: 10.62 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [572, 574, 514, 652, 700, 256, 154]
Line 2: [212, 422, 582, 652, 36, 32]
Line 3: [80, 182, 306, 396, 332]
Line 4: [124, 60, 196, 298, 234]
Line 5: [106, 348, 410, 188]
Line 6: [130, 118, 36]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720
Line 2: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720
Line 3: Route duration (m): 16, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400
Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320
Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480
Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

All users' score:
d0: 91.78%, d1: 7.45%, d2: 0.77%, dun: 0.0%, ATT: 10.5 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [1930, 2180, 1944, 2152, 2026, 1660, 1006]
Line 2: [570, 1510, 1728, 1722, 570, 130]
Line 3: [390, 780, 940, 1206, 950]
Line 4: [616, 360, 1328, 1276, 820]
Line 5: [264, 858, 962, 450]
Line 6: [700, 530, 220]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 19, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250
Line 2: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 14, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1800
Line 3: Route duration (m): 16, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350
Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350
Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050
Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

===========================================================================================================

Main Data:
6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------
Initial Route Set:
Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10]
Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12]
Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]
Line 4: [8, 14, 6, 9, 10]
```

```
Line 5: [5, 7, 9, 13]
Line 6: [2, 1, 3, 11]

Captive users' score:
d0: 86.48%, d1: 13.15%, d2: 0.38%, dun: 0.0%, ATT: 11.8 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [368, 456, 484, 664, 704, 246]
Line 2: [290, 644, 786, 866, 192]
Line 3: [220, 302, 370, 406, 342]
Line 4: [124, 60, 190, 170]
Line 5: [112, 348, 410, 218]
Line 6: [108, 206, 270]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720
Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 12, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880
Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480
Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240
Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480
Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

All users' score:
d0: 84.46%, d1: 14.96%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.79 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [1194, 1850, 1890, 2222, 2064, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2424, 2450, 1612]
Line 3: [842, 1100, 1172, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [310, 864, 968, 574]
Line 6: [596, 910, 1040]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250
Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 17, No. of vehicles: 18, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2550
Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350
Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350
Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050
Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------
Genetic algorithm data:

Population Size: 20, Elite Size: 8, No of iterations: 150
Objective function: minZ = 2*ATT*dtotal + 5*d1*dtotal + 10*d2*dtotal + 50*ATT*dun*dtotal
Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.8, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------
Final Route Set:
Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 12]
Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12, 13]
Line 3: [4, 3, 1, 2, 5, 14, 6]
Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 11]
Line 5: [0, 1, 2, 5, 14, 8]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

Captive users' score:
d0: 94.84%, d1: 5.16%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.7 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [398, 426, 502, 854, 910, 256, 154]
Line 2: [196, 382, 734, 856, 222, 218]
Line 3: [90, 150, 182, 288, 322, 326]
Line 4: [60, 64, 196, 298, 234]
Line 5: [196, 184, 170, 74, 66]
Line 6: [98, 88, 34]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 15, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 960
Line 2: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 13, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880
Line 3: Route duration (m): 17, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400
Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320
Line 5: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240
Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

All users' score:
d0: 94.03%, d1: 5.97%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.52 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [1296, 1638, 1836, 2638, 2514, 1660, 1006]
Line 2: [556, 1430, 2098, 2194, 1010, 570]
Line 3: [402, 610, 738, 830, 922, 938]
Line 4: [360, 376, 1328, 1276, 820]
Line 5: [788, 660, 558, 290, 258]
Line 6: [548, 386, 214]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 18, No. of vehicles: 22, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2700
Line 2: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 17, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250
Line 3: Route duration (m): 17, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 960
Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350
Line 5: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 9, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 800
Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

=================================================================================================================

Main Data:
6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------
Initial Route Set:
Line 1: [1, 2, 5, 7, 9]
Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12, 10]
Line 3: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 12]
Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 12]
Line 5: [2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

Captive users' score:
```

```
d0: 86.48%, d1: 13.15%, d2: 0.38%, dun: 0.0%, ATT: 11.8 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [368, 456, 484, 664, 704, 246]
Line 2: [290, 644, 786, 866, 192]
Line 3: [220, 302, 370, 406, 342]
Line 4: [124, 60, 190, 170]
Line 5: [112, 348, 410, 218]
Line 6: [108, 206, 270]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720
Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 12, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880
Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480
Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240
Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480
Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

All users' score:
d0: 84.46%, d1: 14.96%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.79 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [1194, 1850, 1890, 2222, 2064, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2424, 2450, 1612]
Line 3: [842, 1100, 1172, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [310, 864, 968, 574]
Line 6: [596, 910, 1040]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250
Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 17, No. of vehicles: 18, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2550
Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350
Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350
Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050
Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------
Genetic algorithm data:

Population Size: 20, Elite Size: 8, No of iterations: 150
Objective function: minZ = 2*ATT*dtotal + 5*d1*dtotal + 10*d2*dtotal + 50*ATT*dun*dtotal
Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.5
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------
Final Route Set:
Line 1: [4, 1, 2, 5, 7, 9, 6]
Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 10, 11]
Line 3: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 12]
Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 12]
Line 5: [11, 3, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

Captive users' score:
d0: 92.72%, d1: 7.28%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.84 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [76, 174, 358, 560, 634, 376]
Line 2: [216, 286, 448, 524, 254, 232]
Line 3: [584, 574, 554, 584, 606, 200, 112]
Line 4: [120, 120, 204, 156, 78]
Line 5: [12, 118, 308, 380, 214]
Line 6: [120, 118, 22]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 9, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 640
Line 2: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 9, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560
Line 3: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 640
Line 4: Route duration (m): 27, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240
Line 5: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 6, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400
Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

All users' score:
d0: 92.61%, d1: 7.39%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.5 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [370, 910, 1224, 1622, 1768, 1390]
Line 2: [578, 994, 1342, 1438, 1144, 816]
Line 3: [1960, 2030, 1894, 1810, 1694, 1360, 882]
Line 4: [616, 616, 1138, 1098, 734]
Line 5: [88, 520, 898, 1000, 566]
Line 6: [670, 530, 128]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 13, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1800
Line 2: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 13, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1500
Line 3: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 17, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
Line 4: Route duration (m): 27, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 8, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 5: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 9, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050
Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

=================================================================================================================

Main Data:
6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------
Initial Route Set:
Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10]
Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12]
Line 3: [1, 2, 5, 14, 6]
Line 4: [8, 14, 6, 9, 10]
Line 5: [2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [9, 7, 5, 3]

Captive users' score:
d0: 86.48%, d1: 13.15%, d2: 0.38%, dun: 0.0%, ATT: 11.8 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [368, 456, 484, 664, 704, 246]
```

```
Line 2: [290, 644, 786, 866, 192]
Line 3: [220, 302, 370, 406, 342]
Line 4: [124, 60, 190, 170]
Line 5: [112, 348, 410, 218]
Line 6: [108, 206, 270]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720
Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 12, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880
Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480
Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240
Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480
Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

All users' score:
d0: 84.46%, d1: 14.96%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.79 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [1194, 1850, 1890, 2222, 2064, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2424, 2450, 1612]
Line 3: [842, 1100, 1172, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [310, 864, 968, 574]
Line 6: [596, 910, 1040]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250
Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 17, No. of vehicles: 18, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2550
Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350
Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350
Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050
Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------
Genetic algorithm data:

Population Size: 20, Elite Size: 8, No of iterations: 150
Objective function: minZ = 2*ATT*dtotal + 5*d1*dtotal + 10*d2*dtotal + 50*ATT*dun*dtotal
Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.3
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------
Final Route Set:
Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 12]
Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12, 13]
Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]
Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 11]
Line 5: [2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

Captive users' score:
d0: 92.58%, d1: 7.04%, d2: 0.38%, dun: 0.0%, ATT: 10.62 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [380, 436, 466, 652, 700, 256, 154]
Line 2: [290, 452, 582, 652, 36, 32]
Line 3: [214, 290, 358, 400, 336]
Line 4: [124, 60, 196, 298, 234]
Line 5: [112, 348, 410, 188]
Line 6: [108, 166, 36]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720
Line 2: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720
Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 5.0, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400.0
Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320
Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480
Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

All users' score:
d0: 91.39%, d1: 8.09%, d2: 0.51%, dun: 0.0%, ATT: 10.53 minutes

Bus passenger demand per link:
Line 1: [1216, 1730, 1784, 2152, 2026, 1660, 1006]
Line 2: [960, 1700, 1728, 1722, 570, 130]
Line 3: [826, 1050, 1120, 1216, 956]
Line 4: [620, 360, 1328, 1276, 820]
Line 5: [304, 858, 962, 450]
Line 6: [596, 730, 220]

Bus information per line:
Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 19, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250
Line 2: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 14, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1800
Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350
Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350
Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050
Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 800
```

Αρχείο αποτελεσμάτων δικτύου 7 γραμμών

==========

Main Data:

7 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer

---

Initial Route Set:

Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10]

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12]

Line 3: [1, 2, 5, 14, 6]

Line 4: [8, 14, 6, 9, 10]

Line 5: [2, 5, 7, 9, 13]

Line 6: [0, 1, 3, 11]

Line 7: [0, 1, 2, 5, 14]

Captive users' score:

d0: 87.7%, d1: 12.3%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.72 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [322, 402, 442, 664, 704, 246]

Line 2: [288, 642, 792, 872, 198]

Line 3: [150, 220, 286, 342, 342]

Line 4: [60, 60, 190, 170]

Line 5: [96, 348, 410, 218]

Line 6: [98, 206, 270]

Line 7: [130, 138, 140, 64, 64]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 12, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

All users' score:

d0: 85.61%, d1: 14.39%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.7 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1004, 1630, 1734, 2218, 2062, 1278]

Line 2: [960, 2336, 2440, 2464, 1624]

Line 3: [596, 784, 890, 976, 976]

Line 4: [350, 350, 1300, 848]

Line 5: [270, 864, 968, 574]

Line 6: [530, 906, 1038]

Line 7: [506, 534, 490, 270, 270]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 17, No. of vehicles: 18, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2550

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 5, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Genetic algorithm data:

Population Size: 20, Elite Size: 8, No of iterations: 150

Objective function: minZ = 2*ATT*dtotal + 5*d1*dtotal + 10*d2*dtotal + 50*ATT*dun*dtotal

Pswap (crossover rate): 0.14285714285714285, Pms (Small mod rate): 0.8, Pdel (Delete/Add node rate): 0.3

Final Route Set:

Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 12]

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12, 13]

Line 3: [4, 1, 2, 5, 14, 6]

Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 11]

Line 5: [2, 5, 7, 9, 13]

Line 6: [0, 1, 3, 11]

Line 7: [0, 1, 2, 5, 14, 8]

Captive users' score:

d0: 93.8%, d1: 6.2%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.52 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [402, 426, 438, 652, 700, 256, 154]

Line 2: [216, 426, 582, 652, 36, 32]

Line 3: [74, 136, 230, 320, 324]

Line 4: [60, 64, 196, 298, 234]

Line 5: [92, 348, 410, 188]

Line 6: [90, 118, 36]

Line 7: [200, 184, 156, 72, 64]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 2: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 3: Route duration (m): 16, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400

Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

All users' score:

d0: 92.94%, d1: 7.06%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.4 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1316, 1666, 1670, 2152, 2026, 1660, 1006]

Line 2: [590, 1530, 1728, 1722, 570, 130]

Line 3: [366, 582, 700, 918, 934]

Line 4: [360, 376, 1328, 1276, 820]

Line 5: [234, 858, 962, 450]

Line 6: [504, 526, 218]

Line 7: [808, 688, 528, 292, 260]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 19, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250

Line 2: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 14, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1800

Line 3: Route duration (m): 16, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 960

Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880

==========

Main Data:

7 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer

---

Initial Route Set:

Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10]

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12]

Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]

Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 12]

Line 5: [2, 5, 7, 9]

Line 6: [0, 1, 3, 11]

Line 7: [0, 1, 2, 5, 14]

Captive users' score:

d0: 87.7%, d1: 12.3%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.72 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [322, 402, 442, 664, 704, 246]

Line 2: [288, 642, 792, 872, 198]

Line 3: [150, 220, 286, 342, 342]

Line 4: [60, 60, 190, 170]

Line 5: [96, 348, 410, 218]

Line 6: [98, 206, 270]

Line 7: [130, 138, 140, 64, 64]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 12, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

All users' score:

d0: 85.61%, d1: 14.39%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.7 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1004, 1630, 1734, 2218, 2062, 1278]

Line 2: [960, 2336, 2440, 2464, 1624]

Line 3: [596, 784, 890, 976, 976]

Line 4: [350, 350, 1300, 848]

Line 5: [270, 864, 968, 574]

Line 6: [530, 906, 1038]

Line 7: [506, 534, 490, 270, 270]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 17, No. of vehicles: 18, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2550

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 5, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Genetic algorithm data:

Population Size: 24, Elite Size: 12, No of iterations: 150

Objective function: minZ = 2*ATT*dtotal + 5*d1*dtotal + 10*d2*dtotal + 50*ATT*dun*dtotal

Pswap (crossover rate): 0.14285714285714285, Pms (Small mod rate): 0.8, Pdel (Delete/Add node rate): 0.3

Final Route Set:

Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 11]

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12, 13]

Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]

Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 12]

Line 5: [1, 2, 5, 7, 9, 13]

Line 6: [0, 1, 3, 11]

Line 7: [0, 1, 2, 5, 14, 8]

Captive users' score:

d0: 93.0%, d1: 7.0%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.58 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [324, 338, 382, 612, 662, 338, 232]

Line 2: [288, 450, 594, 672, 58, 32]

Line 3: [148, 202, 272, 336, 336]

Line 4: [60, 60, 194, 188, 128]

Line 5: [46, 134, 368, 422, 188]

Line 6: [98, 166, 36]

Line 7: [128, 126, 132, 64, 64]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 38, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 13, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 2: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400

Line 4: Route duration (m): 27, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Line 5: Route duration (m): 23, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 6, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

All users' score:

d0: 91.84%, d1: 8.16%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.48 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1012, 1210, 1324, 1848, 1792, 1540, 810]

Line 2: [960, 1700, 1774, 1788, 640, 130]

Line 3: [592, 710, 830, 956, 956]

Line 4: [350, 350, 1320, 1280, 900]

Line 5: [368, 584, 1088, 1102, 460]

Line 6: [530, 736, 226]

Line 7: [502, 480, 450, 270, 270]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 38, Frequency (veh/h): 13, No. of vehicles: 19, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1950

Line 2: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 14, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1800

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 960

Line 4: Route duration (m): 27, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 9, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 5: Route duration (m): 23, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 7, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 800

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

==========

Main Data:

7 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer

---

Initial Route Set:

Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10]

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12]

Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]

Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 12]

Line 5: [2, 5, 7, 9, 13]

Line 6: [0, 1, 3, 11]

Line 7: [11, 3, 1, 2]

Captive users' score:

d0: 87.7%, d1: 12.3%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.72 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [322, 402, 442, 664, 704, 246]

Line 2: [288, 642, 792, 872, 198]

Line 3: [150, 220, 286, 342, 342]

Line 4: [60, 60, 190, 170]

Line 5: [96, 348, 410, 218]

Line 6: [98, 206, 270]

Line 7: [130, 138, 140, 64, 64]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 12, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

All users' score:

d0: 85.61%, d1: 14.39%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.7 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1004, 1630, 1734, 2218, 2062, 1278]

Line 2: [960, 2336, 2440, 2464, 1624]

Line 3: [596, 784, 890, 976, 976]

Line 4: [350, 350, 1300, 848]

Line 5: [270, 864, 968, 574]

Line 6: [530, 906, 1038]

Line 7: [506, 534, 490, 270, 270]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 17, No. of vehicles: 18, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2550

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 5, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Genetic algorithm data:

Population Size: 16, Elite Size: 4, No of iterations: 150

Objective function: minZ = 2*ATT*dtotal + 5*d1*dtotal + 10*d2*dtotal + 50*ATT*dun*dtotal

Pswap (crossover rate): 0.14285714285714285, Pms (Small mod rate): 0.8, Pdel (Delete/Add node rate): 0.3

Final Route Set:

Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 11]

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12, 13]

Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]

Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 12]

Line 5: [2, 5, 7, 9, 13]

Line 6: [0, 1, 3, 11]

Line 7: [4, 1, 2, 5, 14, 8]

Captive users' score:

d0: 93.38%, d1: 6.62%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.53 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [386, 410, 422, 634, 676, 338, 232]

Line 2: [220, 430, 590, 668, 54, 32]

Line 3: [214, 256, 294, 340, 336]

Line 4: [62, 60, 194, 188, 128]

Line 5: [92, 348, 410, 188]

Line 6: [88, 118, 36]

Line 7: [70, 70, 96, 54, 56]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 38, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 13, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 2: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400

Line 4: Route duration (m): 27, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

Line 7: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

All users' score:

d0: 92.55%, d1: 7.45%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.42 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1266, 1616, 1610, 2076, 1928, 1542, 810]

Line 2: [620, 1560, 1770, 1786, 640, 130]

Line 3: [858, 900, 900, 968, 956]

Line 4: [356, 350, 1320, 1282, 904]

Line 5: [234, 858, 962, 450]

Line 6: [494, 536, 228]

Line 7: [336, 384, 332, 252, 258]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 38, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 20, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100

Line 2: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 14, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1800

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 5, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 4: Route duration (m): 27, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 9, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Line 7: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400

==========

Main Data:

7 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer

---

Initial Route Set:

Line 1: [1, 2, 5, 7, 9, 10]

Line 2: [3, 5, 7, 9, 12]

Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]

Line 4: [8, 14, 6, 9, 10]

Line 5: [2, 5, 7, 9, 13]

Line 6: [6, 14, 5, 3]

Line 7: [4, 1, 2, 5, 14]

Captive users' score:

d0: 87.7%, d1: 12.3%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.72 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [322, 402, 442, 664, 704, 246]

Line 2: [288, 642, 792, 872, 198]

Line 3: [150, 220, 286, 342, 342]

Line 4: [60, 60, 190, 170]

Line 5: [96, 348, 410, 218]

Line 6: [98, 206, 270]

Line 7: [130, 138, 140, 64, 64]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 12, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

All users' score:

d0: 85.61%, d1: 14.39%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.7 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1004, 1630, 1734, 2218, 2062, 1278]

Line 2: [960, 2336, 2440, 2464, 1624]

Line 3: [596, 784, 890, 976, 976]

Line 4: [350, 350, 1300, 848]

Line 5: [270, 864, 968, 574]

Line 6: [530, 906, 1038]

Line 7: [506, 534, 490, 270, 270]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 17, No. of vehicles: 18, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2550

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 5, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Genetic algorithm data:

Population Size: 20, Elite Size: 8, No of iterations: 150

Objective function: minZ = 2*ATT*dtotal + 5*d1*dtotal + 10*d2*dtotal + 50*ATT*dun*dtotal

Pswap (crossover rate): 0.14285714285714285, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.3

Final Route Set:

Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 12]

Line 2: [11, 3, 5, 7, 9, 12]

Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]

Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 11]

Line 5: [2, 5, 14, 8]

Line 6: [6, 14, 5, 3, 1, 0]

Line 7: [4, 3, 5, 7, 9, 12, 13]

Captive users' score:

d0: 93.9%, d1: 6.1%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.71 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [388, 444, 520, 700, 708, 246, 142]

Line 2: [36, 94, 372, 466, 18]

Line 3: [206, 278, 328, 240, 232]

Line 4: [64, 60, 190, 296, 234]

Line 5: [82, 50, 54]

Line 6: [96, 96, 60, 166, 108]

Line 7: [288, 284, 496, 584, 208, 218]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 2: Route duration (m): 34, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400

Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 5: Route duration (m): 14, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

Line 6: Route duration (m): 20, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Line 7: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 9, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 640

All users' score:

d0: 92.36%, d1: 7.64%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.58 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1236, 1756, 1948, 2294, 2068, 1480, 828]

Line 2: [228, 482, 1048, 1160, 362]

Line 3: [806, 1008, 1050, 702, 674]

Line 4: [370, 350, 1316, 1260, 810]

Line 5: [224, 224, 244]

Line 6: [280, 292, 208, 710, 596]

Line 7: [958, 1026, 1392, 1476, 830, 580]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 16, No. of vehicles: 20, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2400

Line 2: Route duration (m): 34, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 10, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 7.0, No. of vehicles: 5, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050.0

Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 5: Route duration (m): 14, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 6: Route duration (m): 20, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 7: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 11.0, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1500

==========

Main Data:

7 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer

---

Initial Route Set:

Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10]

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12]

Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]

Line 4: [8, 14, 6, 9, 10]

Line 5: [2, 5, 7, 9, 13]

Line 6: [0, 1, 3, 11]

Line 7: [0, 1, 2, 5, 14, 8]

Captive users' score:

d0: 87.7%, d1: 12.3%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.72 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [322, 402, 442, 664, 704, 246]

Line 2: [288, 642, 792, 872, 198]

Line 3: [150, 220, 286, 342, 342]

Line 4: [60, 60, 190, 170]

Line 5: [96, 348, 410, 218]

Line 6: [98, 206, 270]

Line 7: [130, 138, 140, 64, 64]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 12, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

All users' score:

d0: 85.61%, d1: 14.39%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.7 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1004, 1630, 1734, 2218, 2062, 1278]

Line 2: [960, 2336, 2440, 2464, 1624]

Line 3: [596, 784, 890, 976, 976]

Line 4: [350, 350, 1300, 848]

Line 5: [270, 864, 968, 574]

Line 6: [530, 906, 1038]

Line 7: [506, 534, 490, 270, 270]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 17, No. of vehicles: 18, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2550

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 5, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Genetic algorithm data:

Population Size: 20, Elite Size: 8, No of iterations: 150

Objective function: minZ = 2*ATT*dtotal + 5*d1*dtotal + 10*d2*dtotal + 50*ATT*dun*dtotal

Pswap (crossover rate): 0.14285714285714285, Pms (Small mod rate): 0.7, Pdel (Delete/Add node rate): 0.3

Final Route Set:

Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 12]

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 10]

Line 3: [4, 3, 1, 2, 5, 14, 6]

Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 11]

Line 5: [1, 2, 5, 7, 9, 13]

Line 6: [0, 1, 3, 11]

Line 7: [0, 1, 2, 5, 14, 8]

Captive users' score:

d0: 94.46%, d1: 5.54%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.63 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [398, 394, 410, 616, 660, 236, 194]

Line 2: [198, 378, 590, 672, 114]

Line 3: [90, 150, 172, 268, 320, 324]

Line 4: [60, 64, 194, 260, 234]

Line 5: [46, 130, 368, 422, 216]

Line 6: [98, 88, 34]

Line 7: [196, 174, 150, 72, 64]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 2: Route duration (m): 23, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 3: Route duration (m): 17, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400

Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 5: Route duration (m): 23, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 6, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

All users' score:

d0: 94.09%, d1: 5.91%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.5 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1296, 1380, 1420, 1864, 1778, 1922, 1624]

Line 2: [554, 1420, 1786, 1826, 630]

Line 3: [402, 610, 700, 770, 918, 934]

Line 4: [360, 376, 1330, 1060, 820]

Line 5: [348, 554, 1090, 1106, 586]

Line 6: [548, 390, 218]

Line 7: [788, 622, 498, 292, 260]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 13, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1950

Line 2: Route duration (m): 23, Frequency (veh/h): 13, No. of vehicles: 11, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1950

Line 3: Route duration (m): 17, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 960

Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 5: Route duration (m): 23, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 7, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 9, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 800

==========

Main Data:

7 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer

---

Initial Route Set:

Line 1: [1, 2, 5, 7, 9, 10]

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9]

Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]

Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 12]

Line 5: [8, 14, 6, 9]

Line 6: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10]

Line 7: [0, 1, 2, 5, 14, 8]

Captive users' score:

d0: 87.7%, d1: 12.3%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.72 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [322, 402, 442, 664, 704, 246]

Line 2: [288, 642, 792, 872, 198]

Line 3: [150, 220, 286, 342, 342]

Line 4: [60, 60, 190, 170]

Line 5: [96, 348, 410, 218]

Line 6: [98, 206, 270]

Line 7: [130, 138, 140, 64, 64]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 12, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

All users' score:

d0: 85.61%, d1: 14.39%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.7 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1004, 1630, 1734, 2218, 2062, 1278]

Line 2: [960, 2336, 2440, 2464, 1624]

Line 3: [596, 784, 890, 976, 976]

Line 4: [350, 350, 1300, 848]

Line 5: [270, 864, 968, 574]

Line 6: [530, 906, 1038]

Line 7: [506, 534, 490, 270, 270]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 17, No. of vehicles: 18, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2550

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 5, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Genetic algorithm data:

Population Size: 20, Elite Size: 8, No of iterations: 150

Objective function: minZ = 2*ATT*dtotal + 5*d1*dtotal + 10*d2*dtotal + 50*ATT*dun*dtotal

Pswap (crossover rate): 0.14285714285714285, Pms (Small mod rate): 0.8, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4

Final Route Set:

Line 1: [4, 3, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 12]

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12, 13]

Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]

Line 4: [7, 14, 6, 9, 10, 12]

Line 5: [0, 1, 3, 5, 7, 9, 13]

Line 6: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 11]

Line 7: [8, 14, 6, 9, 10, 11]

Captive users' score:

d0: 93.62%, d1: 6.24%, d2: 0.14%, dun: 0.0%, ATT: 10.69 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [88, 112, 94, 166, 314, 362, 112, 64]

Line 2: [198, 302, 420, 486, 24, 30]

Line 3: [220, 272, 340, 374, 318]

Line 4: [32, 22, 74, 90, 64]

Line 5: [82, 76, 122, 294, 368, 188]

Line 6: [368, 376, 404, 518, 540, 194, 134]

Line 7: [126, 60, 120, 156, 120]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 6, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400

Line 2: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400

Line 4: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

Line 5: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400

Line 6: Route duration (m): 38, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Line 7: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

All users' score:

d0: 94.16%, d1: 5.52%, d2: 0.32%, dun: 0.0%, ATT: 10.6 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [378, 576, 744, 814, 1146, 1184, 986, 612]

Line 2: [576, 992, 1158, 1230, 402, 118]

Line 3: [874, 934, 1028, 1088, 860]

Line 4: [130, 100, 498, 690, 536]

Line 5: [486, 314, 498, 838, 962, 458]

Line 6: [1272, 1382, 1440, 1640, 1544, 946, 586]

Line 7: [618, 360, 828, 672, 440]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 10, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200

Line 2: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200

Line 4: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 5: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 9, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 6: Route duration (m): 38, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1650

Line 7: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 13, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880

==========

Main Data:

7 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer

---

Initial Route Set:

Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10]

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12]

Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10]

Line 4: [1, 2, 5, 7, 9]

Line 5: [3, 5, 7, 9, 13]

Line 6: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 12]

Line 7: [0, 1, 2, 5, 14, 8]

Captive users' score:

d0: 87.7%, d1: 12.3%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.72 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [322, 402, 442, 664, 704, 246]

Line 2: [288, 642, 792, 872, 198]

Line 3: [150, 220, 286, 342, 342]

Line 4: [60, 60, 190, 170]

Line 5: [96, 348, 410, 218]

Line 6: [98, 206, 270]

Line 7: [130, 138, 140, 64, 64]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 12, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

All users' score:

d0: 85.61%, d1: 14.39%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.7 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1004, 1630, 1734, 2218, 2062, 1278]

Line 2: [960, 2336, 2440, 2464, 1624]

Line 3: [596, 784, 890, 976, 976]

Line 4: [350, 350, 1300, 848]

Line 5: [270, 864, 968, 574]

Line 6: [530, 906, 1038]

Line 7: [506, 534, 490, 270, 270]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 17, No. of vehicles: 18, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2550

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 5, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Genetic algorithm data:

Population Size: 20, Elite Size: 8, No of iterations: 150

Objective function: minZ = 2*ATT*dtotal + 5*d1*dtotal + 10*d2*dtotal + 50*ATT*dun*dtotal

Pswap (crossover rate): 0.14285714285714285, Pms (Small mod rate): 0.8, Pdel (Delete/Add node rate): 0.2

Final Route Set:

Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 11]

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 10, 11]

Line 3: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 12]

Line 4: [4, 3, 1, 2, 5, 7, 9, 6]

Line 5: [0, 1, 3, 5, 7, 9, 13]

Line 6: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 12, 13]

Line 7: [8, 14, 6, 9, 7]

Captive users' score:

d0: 93.94%, d1: 6.06%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.91 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [208, 206, 218, 282, 298, 194, 126]

Line 2: [204, 292, 378, 414, 204, 134]

Line 3: [210, 208, 218, 282, 300, 150, 128]

Line 4: [80, 148, 178, 296, 470, 510, 382]

Line 5: [68, 72, 100, 220, 258, 188]

Line 6: [198, 196, 208, 266, 276, 40, 32]

Line 7: [94, 94, 168, 90]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 38, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 6, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 2: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Line 3: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 4: Route duration (m): 29, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Line 3: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 6: Route duration (m): 35, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 6, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 7: Route duration (m): 25, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

All users' score:

d0: 94.16%, d1: 5.84%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.59 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [756, 790, 828, 928, 884, 940, 520]

Line 2: [556, 1012, 1198, 1202, 980, 510]

Line 3: [740, 764, 792, 892, 848, 1150, 946]

Line 4: [390, 614, 782, 918, 1292, 1356, 1354]

Line 5: [404, 302, 422, 674, 716, 458]

Line 6: [710, 714, 732, 792, 726, 596, 130]

Line 7: [576, 576, 1114, 314]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 38, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 17, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 960

Line 2: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 3: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 10, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200

Line 4: Route duration (m): 29, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 11, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1500

Line 5: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 6: Route duration (m): 35, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 13, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 800

Line 7: Route duration (m): 25, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 8, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200

Αρχείο αποτελεσμάτων δικτύου 8 γραμμών

==========

Main Data:

8 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer

---

Initial Route Set:

Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10]

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12]

Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]

Line 4: [8, 14, 6, 9, 10]

Line 5: [2, 5, 7, 9, 13]

Line 6: [0, 1, 3, 11]

Line 7: [0, 1, 2, 5, 7]

Line 8: [7, 14, 5, 3, 11]

Captive users' score:

d0: 88.92%, d1: 11.08%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.66 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [322, 402, 442, 664, 706, 248]

Line 2: [198, 530, 790, 872, 198]

Line 3: [150, 214, 280, 230, 230]

Line 4: [60, 60, 190, 170]

Line 5: [96, 346, 410, 218]

Line 6: [98, 200, 266]

Line 7: [130, 138, 140, 58, 58]

Line 8: [84, 110, 106, 106]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 12, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

Line 8: Route duration (m): 13, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 1, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

All users' score:

d0: 86.58%, d1: 13.42%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.65 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1004, 1630, 1732, 2236, 2074, 1284]

Line 2: [606, 1892, 2422, 2452, 1624]

Line 3: [596, 764, 868, 658, 658]

Line 4: [360, 350, 1300, 842]

Line 5: [268, 866, 970, 576]

Line 6: [530, 886, 1034]

Line 7: [506, 534, 488, 240, 250]

Line 8: [340, 446, 338, 318]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 17, No. of vehicles: 18, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2550

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Line 8: Route duration (m): 13, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Genetic algorithm data:

Population Size: 16, Elite Size: 4, No of iterations: 150

Objective function: minZ = 2*ATT*dtotal + 5*d1*dtotal + 10*d2*dtotal + 50*ATT*dun*dtotal

Pswap (crossover rate): 0.125, Pms (Small mod rate): 0.8, Pdel (Delete/Add node rate): 0.3

Final Route Set:

Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 12]

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12, 13]

Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]

Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 11]

Line 5: [2, 5, 7, 9, 13]

Line 6: [0, 1, 3, 11]

Line 7: [4, 3, 5, 7, 14, 6]

Line 8: [0, 1, 2, 5, 14, 8]

Captive users' score:

d0: 95.54%, d1: 4.46%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.44 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [334, 382, 424, 644, 704, 260, 154]

Line 2: [196, 322, 554, 652, 36, 32]

Line 3: [144, 208, 274, 266, 266]

Line 4: [64, 60, 196, 298, 234]

Line 5: [96, 338, 410, 188]

Line 6: [98, 166, 32]

Line 7: [90, 122, 72, 82, 74]

Line 8: [124, 132, 134, 56, 60]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 2: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Line 7: Route duration (m): 14, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

Line 8: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

All users' score:

d0: 94.16%, d1: 5.84%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.35 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1032, 1516, 1632, 2100, 2038, 1660, 1006]

Line 2: [578, 1160, 1548, 1698, 570, 130]

Line 3: [582, 746, 848, 710, 710]

Line 4: [374, 360, 1328, 1264, 820]

Line 5: [262, 800, 962, 450]

Line 6: [530, 726, 214]

Line 7: [366, 514, 302, 278, 250]

Line 8: [492, 506, 458, 228, 242]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 14.0, No. of vehicles: 17, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100.0

Line 2: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 14, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1800

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880

Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 800

Line 7: Route duration (m): 14, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Line 8: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

==========

Main Data:

8 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer

---

Initial Route Set:

Line 1: [1, 2, 5, 7, 9, 10]

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12]

Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]

Line 4: [8, 14, 6, 9, 10]

Line 5: [2, 5, 7, 9, 13]

Line 6: [6, 14, 5, 3, 1, 4]

Line 7: [0, 1, 2, 5, 14, 8]

Line 8: [3, 5, 14, 6]

Captive users' score:

d0: 88.92%, d1: 11.08%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.66 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [322, 402, 442, 664, 706, 248]

Line 2: [198, 530, 790, 872, 198]

Line 3: [150, 214, 280, 230, 230]

Line 4: [60, 60, 190, 170]

Line 5: [96, 346, 410, 218]

Line 6: [98, 200, 266]

Line 7: [130, 138, 140, 58, 58]

Line 8: [84, 110, 106, 106]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 12, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

Line 8: Route duration (m): 13, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 1, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

All users' score:

d0: 86.58%, d1: 13.42%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.65 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1004, 1630, 1732, 2236, 2074, 1284]

Line 2: [606, 1892, 2422, 2452, 1624]

Line 3: [596, 764, 868, 658, 658]

Line 4: [360, 350, 1300, 842]

Line 5: [268, 866, 970, 576]

Line 6: [530, 886, 1034]

Line 7: [506, 534, 488, 240, 250]

Line 8: [340, 446, 338, 318]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 17, No. of vehicles: 18, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2550

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Line 8: Route duration (m): 13, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Genetic algorithm data:

Population Size: 24, Elite Size: 12, No of iterations: 150

Objective function: minZ = 2*ATT*dtotal + 5*d1*dtotal + 10*d2*dtotal + 50*ATT*dun*dtotal

Pswap (crossover rate): 0.125, Pms (Small mod rate): 0.8, Pdel (Delete/Add node rate): 0.3

Final Route Set:

Line 1: [4, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 11]

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12, 10]

Line 3: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 12, 13]

Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 11]

Line 5: [2, 5, 7, 9, 13]

Line 6: [6, 14, 5, 3, 1, 4]

Line 7: [0, 1, 2, 5, 14, 6]

Line 8: [4, 3, 5, 7, 9, 10, 11]

Captive users' score:

d0: 93.94%, d1: 5.82%, d2: 0.23%, dun: 0.0%, ATT: 10.68 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [44, 80, 128, 256, 296, 162, 74]

Line 2: [94, 174, 318, 368, 34, 90]

Line 3: [420, 386, 380, 452, 450, 60, 30]

Line 4: [116, 60, 196, 168, 78]

Line 5: [74, 212, 248, 188]

Line 6: [104, 114, 72, 116, 36]

Line 7: [270, 278, 330, 280, 234]

Line 8: [118, 202, 360, 422, 186, 94]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 36, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 6, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 2: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400

Line 3: Route duration (m): 35, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 6: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

Line 7: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400

Line 8: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

All users' score:

d0: 93.32%, d1: 6.49%, d2: 0.19%, dun: 0.0%, ATT: 10.63 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [220, 590, 664, 956, 968, 852, 342]

Line 2: [254, 580, 894, 942, 560, 364]

Line 3: [1484, 1366, 1302, 1360, 1170, 650, 130]

Line 4: [610, 360, 1328, 718, 294]

Line 5: [190, 536, 598, 450]

Line 6: [300, 390, 266, 508, 170]

Line 7: [1124, 966, 1002, 820, 660]

Line 8: [314, 750, 1136, 1224, 908, 374]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 36, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 10, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 2: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 15, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 960

Line 3: Route duration (m): 35, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 13, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1500

Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 640

Line 6: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Line 7: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200

Line 8: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

==========

Main Data:

8 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer

---

Initial Route Set:

Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10]

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12]

Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]

Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 11]

Line 5: [2, 5, 7, 9]

Line 6: [0, 1, 3, 11]

Line 7: [0, 1, 2, 5, 14, 8]

Line 8: [11, 3, 5, 14, 6]

Captive users' score:

d0: 88.92%, d1: 11.08%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.66 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [322, 402, 442, 664, 706, 248]

Line 2: [198, 530, 790, 872, 198]

Line 3: [150, 214, 280, 230, 230]

Line 4: [60, 60, 190, 170]

Line 5: [96, 346, 410, 218]

Line 6: [98, 200, 266]

Line 7: [130, 138, 140, 58, 58]

Line 8: [84, 110, 106, 106]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 12, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

Line 8: Route duration (m): 13, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 1, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

All users' score:

d0: 86.58%, d1: 13.42%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.65 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1004, 1630, 1732, 2236, 2074, 1284]

Line 2: [606, 1892, 2422, 2452, 1624]

Line 3: [596, 764, 868, 658, 658]

Line 4: [360, 350, 1300, 842]

Line 5: [268, 866, 970, 576]

Line 6: [530, 886, 1034]

Line 7: [506, 534, 488, 240, 250]

Line 8: [340, 446, 338, 318]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 17, No. of vehicles: 18, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2550

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Line 8: Route duration (m): 13, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Genetic algorithm data:

Population Size: 16, Elite Size: 4, No of iterations: 150

Objective function: minZ = 2*ATT*dtotal + 5*d1*dtotal + 10*d2*dtotal + 50*ATT*dun*dtotal

Pswap (crossover rate): 0.125, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.3

Final Route Set:

Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 12]

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 10, 12]

Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]

Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 11]

Line 5: [2, 5, 7, 9, 13]

Line 6: [0, 1, 3, 11]

Line 7: [0, 1, 2, 5, 14, 8]

Line 8: [4, 3, 5, 14, 6]

Captive users' score:

d0: 94.79%, d1: 5.21%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.58 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [334, 382, 424, 636, 670, 196, 108]

Line 2: [202, 342, 596, 682, 156, 82]

Line 3: [144, 208, 274, 230, 230]

Line 4: [60, 60, 190, 258, 232]

Line 5: [96, 346, 410, 214]

Line 6: [98, 166, 32]

Line 7: [124, 132, 134, 58, 58]

Line 8: [82, 102, 100, 100]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

Line 8: Route duration (m): 13, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 1, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

All users' score:

d0: 93.64%, d1: 6.36%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.5 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1032, 1516, 1632, 2062, 1870, 1326, 850]

Line 2: [614, 1276, 1812, 1868, 1226, 770]

Line 3: [582, 746, 848, 658, 658]

Line 4: [370, 360, 1326, 1058, 820]

Line 5: [262, 862, 968, 576]

Line 6: [530, 726, 214]

Line 7: [492, 506, 458, 230, 240]

Line 8: [332, 402, 318, 298]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 17, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 13, No. of vehicles: 14, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1950

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880

Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 800

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Line 8: Route duration (m): 13, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

==========

Main Data:

8 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer

---

Initial Route Set:

Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10]

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12]

Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]

Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 11]

Line 5: [2, 5, 7, 9, 13]

Line 6: [8, 14, 5, 3, 11]

Line 7: [0, 1, 2, 5, 14, 8]

Line 8: [3, 5, 14, 6]

Captive users' score:

d0: 88.92%, d1: 11.08%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.66 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [322, 402, 442, 664, 706, 248]

Line 2: [198, 530, 790, 872, 198]

Line 3: [150, 214, 280, 230, 230]

Line 4: [60, 60, 190, 170]

Line 5: [96, 346, 410, 218]

Line 6: [98, 200, 266]

Line 7: [130, 138, 140, 58, 58]

Line 8: [84, 110, 106, 106]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 12, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

Line 8: Route duration (m): 13, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 1, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

All users' score:

d0: 86.58%, d1: 13.42%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.65 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1004, 1630, 1732, 2236, 2074, 1284]

Line 2: [606, 1892, 2422, 2452, 1624]

Line 3: [596, 764, 868, 658, 658]

Line 4: [360, 350, 1300, 842]

Line 5: [268, 866, 970, 576]

Line 6: [530, 886, 1034]

Line 7: [506, 534, 488, 240, 250]

Line 8: [340, 446, 338, 318]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 17, No. of vehicles: 18, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2550

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Line 8: Route duration (m): 13, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Genetic algorithm data:

Population Size: 16, Elite Size: 4, No of iterations: 150

Objective function: minZ = 2*ATT*dtotal + 5*d1*dtotal + 10*d2*dtotal + 50*ATT*dun*dtotal

Pswap (crossover rate): 0.125, Pms (Small mod rate): 0.7, Pdel (Delete/Add node rate): 0.3

Final Route Set:

Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 12]

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12, 13]

Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]

Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 11]

Line 5: [2, 5, 7, 9, 13]

Line 6: [0, 1, 3, 11]

Line 7: [0, 1, 2, 5, 14, 8]

Line 8: [4, 3, 5, 14, 6]

Captive users' score:

d0: 95.02%, d1: 4.98%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.47 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [334, 382, 424, 652, 702, 258, 154]

Line 2: [198, 338, 580, 652, 36, 32]

Line 3: [144, 208, 274, 230, 230]

Line 4: [60, 60, 196, 298, 234]

Line 5: [96, 346, 410, 188]

Line 6: [98, 166, 32]

Line 7: [124, 132, 134, 58, 58]

Line 8: [84, 104, 100, 100]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 2: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

Line 8: Route duration (m): 13, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 1, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

All users' score:

d0: 93.51%, d1: 6.49%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.4 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1032, 1516, 1632, 2170, 2038, 1666, 1006]

Line 2: [606, 1256, 1710, 1710, 570, 130]

Line 3: [582, 746, 848, 658, 658]

Line 4: [370, 360, 1328, 1270, 820]

Line 5: [262, 858, 962, 450]

Line 6: [530, 726, 214]

Line 7: [492, 506, 458, 230, 240]

Line 8: [340, 424, 318, 298]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 19, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250

Line 2: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 14, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1800

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880

Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 800

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Line 8: Route duration (m): 13, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

==========

Main Data:

8 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer

---

Initial Route Set:

Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10]

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12]

Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]

Line 4: [3, 5, 7, 9, 10]

Line 5: [2, 5, 7, 9, 13]

Line 6: [0, 1, 3, 11]

Line 7: [0, 1, 2, 5, 14, 8]

Line 8: [1, 2, 5, 14, 6]

Captive users' score:

d0: 88.92%, d1: 11.08%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.66 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [322, 402, 442, 664, 706, 248]

Line 2: [198, 530, 790, 872, 198]

Line 3: [150, 214, 280, 230, 230]

Line 4: [60, 60, 190, 170]

Line 5: [96, 346, 410, 218]

Line 6: [98, 200, 266]

Line 7: [130, 138, 140, 58, 58]

Line 8: [84, 110, 106, 106]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 12, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

Line 8: Route duration (m): 13, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 1, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

All users' score:

d0: 86.58%, d1: 13.42%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.65 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1004, 1630, 1732, 2236, 2074, 1284]

Line 2: [606, 1892, 2422, 2452, 1624]

Line 3: [596, 764, 868, 658, 658]

Line 4: [360, 350, 1300, 842]

Line 5: [268, 866, 970, 576]

Line 6: [530, 886, 1034]

Line 7: [506, 534, 488, 240, 250]

Line 8: [340, 446, 338, 318]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 17, No. of vehicles: 18, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2550

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Line 8: Route duration (m): 13, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Genetic algorithm data:

Population Size: 16, Elite Size: 4, No of iterations: 150

Objective function: minZ = 2*ATT*dtotal + 5*d1*dtotal + 10*d2*dtotal + 50*ATT*dun*dtotal

Pswap (crossover rate): 0.125, Pms (Small mod rate): 0.8, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4

Final Route Set:

Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 12]

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12, 10]

Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]

Line 4: [3, 5, 7, 9, 10, 11]

Line 5: [2, 5, 7, 9, 13]

Line 6: [0, 1, 3, 11]

Line 7: [8, 14, 6, 9, 10]

Line 8: [4, 3, 1, 2, 5, 14, 8]

Captive users' score:

d0: 93.62%, d1: 6.38%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.63 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [392, 422, 436, 564, 572, 196, 108]

Line 2: [192, 290, 420, 482, 42, 40]

Line 3: [206, 252, 290, 338, 334]

Line 4: [122, 310, 388, 240, 230]

Line 5: [92, 274, 312, 214]

Line 6: [96, 88, 32]

Line 7: [62, 60, 188, 118]

Line 8: [86, 104, 74, 98, 56, 58]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 640

Line 2: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 9, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400

Line 4: Route duration (m): 29, Frequency (veh/h): 5, No. of vehicles: 6, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

Line 7: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Line 8: Route duration (m): 23, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

All users' score:

d0: 93.71%, d1: 6.29%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.49 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1266, 1618, 1660, 1892, 1660, 1338, 850]

Line 2: [578, 962, 1174, 1206, 602, 168]

Line 3: [828, 860, 888, 968, 956]

Line 4: [552, 972, 1090, 1114, 810]

Line 5: [234, 684, 744, 568]

Line 6: [538, 390, 220]

Line 7: [356, 350, 1316, 542]

Line 8: [376, 514, 466, 358, 244, 250]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 13, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1950

Line 2: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 5, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 4: Route duration (m): 29, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 9, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 800

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Line 7: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 8: Route duration (m): 23, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

==========

Main Data:

8 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer

---

Initial Route Set:

Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10]

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12]

Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]

Line 4: [8, 14, 6, 9, 10]

Line 5: [14, 5, 7, 9, 13]

Line 6: [0, 1, 3, 11]

Line 7: [0, 1, 2, 5, 14, 8]

Line 8: [4, 3, 5, 7, 9, 10]

Captive users' score:

d0: 88.92%, d1: 11.08%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.66 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [322, 402, 442, 664, 706, 248]

Line 2: [198, 530, 790, 872, 198]

Line 3: [150, 214, 280, 230, 230]

Line 4: [60, 60, 190, 170]

Line 5: [96, 346, 410, 218]

Line 6: [98, 200, 266]

Line 7: [130, 138, 140, 58, 58]

Line 8: [84, 110, 106, 106]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 12, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

Line 8: Route duration (m): 13, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 1, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

All users' score:

d0: 86.58%, d1: 13.42%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.65 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1004, 1630, 1732, 2236, 2074, 1284]

Line 2: [606, 1892, 2422, 2452, 1624]

Line 3: [596, 764, 868, 658, 658]

Line 4: [360, 350, 1300, 842]

Line 5: [268, 866, 970, 576]

Line 6: [530, 886, 1034]

Line 7: [506, 534, 488, 240, 250]

Line 8: [340, 446, 338, 318]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 15, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2250

Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 17, No. of vehicles: 18, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2550

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880

Line 4: Route duration (m): 22, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 5: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 6, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Line 8: Route duration (m): 13, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Genetic algorithm data:

Population Size: 16, Elite Size: 4, No of iterations: 150

Objective function: minZ = 2*ATT*dtotal + 5*d1*dtotal + 10*d2*dtotal + 50*ATT*dun*dtotal

Pswap (crossover rate): 0.125, Pms (Small mod rate): 0.8, Pdel (Delete/Add node rate): 0.2

Final Route Set:

Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 12]

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12, 13]

Line 3: [0, 1, 2, 5, 14, 6]

Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 11]

Line 5: [6, 14, 5, 7, 9, 13]

Line 6: [0, 1, 3, 11]

Line 7: [0, 1, 2, 5, 14, 8]

Line 8: [4, 3, 5, 14, 6]

Captive users' score:

d0: 95.49%, d1: 4.51%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.45 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [334, 382, 488, 698, 710, 258, 154]

Line 2: [196, 336, 576, 652, 36, 32]

Line 3: [144, 208, 288, 210, 210]

Line 4: [62, 60, 196, 298, 234]

Line 5: [50, 54, 316, 400, 186]

Line 6: [98, 166, 32]

Line 7: [124, 132, 148, 58, 60]

Line 8: [82, 102, 80, 80]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 2: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 10, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 4, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 320

Line 5: Route duration (m): 23, Frequency (veh/h): 5.0, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 400.0

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

Line 8: Route duration (m): 13, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 1, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

All users' score:

d0: 94.09%, d1: 5.91%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 10.37 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1032, 1522, 1822, 2278, 2088, 1666, 1006]

Line 2: [610, 1260, 1674, 1710, 570, 130]

Line 3: [582, 748, 894, 576, 576]

Line 4: [376, 360, 1328, 1270, 820]

Line 5: [166, 178, 802, 924, 460]

Line 6: [530, 726, 214]

Line 7: [492, 508, 504, 218, 234]

Line 8: [344, 428, 236, 216]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 16, No. of vehicles: 20, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2400

Line 2: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 14, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1800

Line 3: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 960

Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 11, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1350

Line 5: Route duration (m): 23, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 11, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 960

Line 6: Route duration (m): 21, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 8, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 800

Line 7: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 7, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560

Line 8: Route duration (m): 13, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 3, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480