



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ
ΥΠΟΔΟΜΗΣ

Διπλωματική εργασία

Επανασχεδιασμός Δικτύου Αστικών Συγκοινωνιών με Ηλεκτρικά
Λεωφορεία



Κωνσταντίνα Πυλαρινού

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Κεπαπτσόγλου, Επίκουρος Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2020

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κ. Κεραπτσόγλου Κωνσταντίνο, τόσο για τη σημαντική βοήθεια και το ενδιαφέρον του στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας, όσο και για την δυνατότητα που μου προσέφερε να ασχοληθώ με ένα πραγματικά ιδιαίτερα ενδιαφέρον και επίκαιρο αντικείμενο.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Διδάκτορα της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κ. 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.

Περίληψη

Τίτλος: «Επανασχεδιασμός Δικτύου Αστικών Συγκοινωνιών με Ηλεκτρικά Λεωφορεία»

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τον επανασχεδιασμό ενός δικτύου αστικών συγκοινωνιών με ενσωμάτωση ηλεκτρικών λεωφορείων στον διαθέσιμο στόλο. Με τον τρόπο αυτό, λαμβάνονται υπόψη τόσο οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των αστικών μέσων μεταφοράς όσο και το κόστος υλοποίησης ενός τέτοιου σχεδίου. Με δεδομένα εισόδου τον πίνακα Πρόέλευσης – Προορισμού των χρηστών, τον πίνακα Χρόνου Διαδρομών καθώς και το αρχικό δίκτυο γίνεται επανασχεδιασμός του υπάρχοντος δικτύου και βελτιστοποίηση ως προς το κόστος των χρηστών και του φορέα, ώστε στο καινούργιο δίκτυο να χρησιμοποιούνται ηλεκτρικά λεωφορεία στις γραμμές όπου αυτό είναι εφικτό. Το μοντέλο εφαρμόζεται στο Ελβετικό δίκτυο του Mandl και πραγματοποιούνται αναλύσεις ευαισθησίας για να εξεταστεί η επιρροή σημαντικών παραμέτρων, όπως η χωρητικότητα της μπαταρίας των οχημάτων και το κόστος των φορτιστών.

Λέξεις κλειδιά: ηλεκτρικά λεωφορεία, επανασχεδιασμός δικτύου αστικών συγκοινωνιών, βελτιστοποίηση δικτύου, γενετικός αλγόριθμος

Abstract

Title: «Public Network Redesign with Electric Vehicles»

The objective of this thesis is the Redesign of the Public Network, with the use of battery electric vehicles (EV). In this way the environmental impact of urban transportation is reduced while taking into account implementation cost. Based on the Origin – Destination (O-D), road network matrices and the initial network, a redesign of the transit route network is performed so that electric buses may be deployed where possible under cost minimization for users and operators. The model is applied for the case of Mandl's Swiss benchmark network. Extensive sensitivity analysis is carried out to investigate the effect of important parameters such as battery capacity and charger cost.

Key words: battery electric vehicles (EV), transit route network redesign, network optimization, genetic algorithm

Εκτεταμένη Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι μια προσέγγιση στον επανασχεδιασμό ενός δικτύου Αστικών Συγκοινωνιών (Public Transportation Network Redesign Problem – PTNRP) με ηλεκτρικά λεωφορεία. Λαμβάνοντας υπόψη, το δίκτυο, τους περιορισμούς του δικτύου (όπως ο αριθμός των στάσεων, το σύνολο των γραμμών), την εξυπηρέτηση της επιβατικής ζήτησης και το κόστος δημιουργείται ένας αλγόριθμος που εκτός από τον επανασχεδιασμό του δικτύου βρίσκει τους κόμβους που πρέπει να τοποθετηθούν φορτιστές και υπολογίζει το κόστος κατασκευής. Το αποτέλεσμα είναι ένα δίκτυο ίσων γραμμών με το αρχικό, που στις περιπτώσεις χρήσης ηλεκτρικών λεωφορείων, οι γραμμές αυτές αποτελούνται από δύο (2) σταθμούς φόρτισης (αφετηρία, τέρμα).

Τα δεδομένα του προβλήματος είναι το δίκτυο, η υφιστάμενη κατάσταση του δικτύου – με τις διαδρομές – ο πίνακας Προέλευσης – Προορισμού του συνόλου των χρηστών καθώς επίσης και ο πίνακας Χρόνου Διαδρομών. Το δίκτυο διαχωρίζεται σε κόμβους και συνδέσμους, όπου κόμβοι είναι οι στάσεις των γραμμών και σύνδεσμοι οι ενώσεις των γειτονικών κόμβων που έχουν χρόνο διαδρομής, ο οποίος χρόνος διαδρομής θεωρείται σταθερός.

Η αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται ως το άθροισμα του κόστους για την υλοποίηση του ηλεκτρικού δικτύου, του κόστους των επιβατών που εξυπηρετούνται με βάση τον χρόνο διαδρομής αλλά και του κόστους των επιβατών που θεωρούνται ανικανοποίητοι από το δίκτυο γραμμών. Οι περιορισμοί που τέθηκαν είναι οι εξής:

1. **Μήκος γραμμών:** Οι γραμμές του νέου, παραγόμενου δικτύου πρέπει να βρίσκονται μεταξύ κάποιων ορίων μήκους, που ορίζονται από τον αριθμό των στάσεων που εξυπηρετεί κάθε γραμμή.
2. **Ομοιότητα γραμμών:** Στο παραγόμενο δίκτυο δεν πρέπει να υπάρχουν γραμμές με την ίδια αλληλουχία στάσεων, διότι το δίκτυο θα θεωρείται ελλιπές ως προς τον αριθμό των γραμμών.
3. **Εξυπηρέτηση επιβατών:** Το παραγόμενο δίκτυο πρέπει να εξυπηρετεί όλους τους επιβάτες, να μην αφήνει κάποιο κόμβο από τον οποίο παράγονται ή έλκονται μετακινήσεις εκτός διαδρομής.
4. **Μέγεθος οχημάτων:** Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι λεωφορείων, τα συνήθη λεωφορεία χωρητικότητας 80 θέσεων και τα αρθρωτά χωρητικότητας 150 θέσεων.
5. **Συχνότητες λεωφορείων:** Με βάση τον τύπο του οχήματος, υπολογίζονται οι συχνότητες διέλευσης που πρέπει να είναι μεταξύ των επιτρεπτών ορίων.
6. **Δημιουργία ηλεκτρικού δικτύου:** Επιλέγεται σε ποιες γραμμές θα τοποθετηθούν ηλεκτρικά λεωφορεία με βάση τους περιορισμούς.

Η επίλυση του προβλήματος έγινε με την δημιουργία προγράμματος που αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Python 3.7.4. Το προγραμματιστικό περιβάλλον που επιλέχθηκε είναι το Anaconda Navigator 3.0 – Spyder 3.7. Το πρόγραμμα έχει την ακόλουθη ροή:

1. Εισαγωγή δεδομένων
2. Αξιολόγηση αρχικού δικτύου
3. Υπολογισμός αποστάσεων
4. Βελτιστοποίηση με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου
5. Αξιολόγηση τελικού δικτύου και υπολογισμός οχημάτων
6. Υπολογισμός κόστος κατασκευής ηλεκτρικού δικτύου
7. Εξαγωγή δεδομένων

Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου αποδεικνύουν ότι το πρόγραμμα παράγει λογικά αποτελέσματα. Ωστόσο, οι δοκιμές έγιναν σε ένα μικρό δίκτυο καλό θα ήταν να δοκιμαστεί σε πραγματικό δίκτυο λαμβάνοντας υπόψη όλους τους περιορισμούς και τις πραγματικές τιμές του κόστους.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	7
1.1	Γενικά	7
1.2	Σκοπός διπλωματικής εργασίας	8
1.3	Δομή διπλωματικής εργασίας	8
2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	10
2.1	Ηλεκτρικά Λεωφορεία	10
2.1.1	Τρόποι φόρτισης.....	11
2.1.2	Μπαταρία	12
2.2	Μέγεθος μπαταρίας και Κατανάλωση ενέργειας	13
2.3	Σχεδιασμός Δικτύου Αστικών Συγκοινωνιών (Transit Route Network Design Problem -TRNDP) 14	
2.4	Επανασχεδιασμός Δικτύου Αστικών Συγκοινωνιών (Public Transportation Network Redesign Problem - PTNRP).....	15
2.5	Κόστος.....	23
2.6	Σύνοψη ευρημάτων	24
3	Μεθοδολογία.....	25
3.1	Εισαγωγή.....	25
3.2	Αντικειμενική συνάρτηση	25
3.3	Περιορισμοί	26
3.4	Ποινές.....	28
4	Εφαρμογή	29
4.1	Δεδομένα προβλήματος	29
4.1.1	Περιοχή μελέτης I	29
4.1.1.1	Δεδομένα Περιοχής Μελέτης I	30
4.1.1.2	Παραδοχές Περιοχής Μελέτης I	32
4.1.2	Περιοχή μελέτης II	32
4.1.2.1	Δεδομένα Περιοχής μελέτης II.....	33
4.1.2.2	Παραδοχές Περιοχής Μελέτης II	36
4.1.3	Κόστος υλοποίησης γραμμών.....	37
4.2	Περιβάλλον επίλυσης	37

4.3	Γενετικοί αλγόριθμοι	38
4.3.1	Διαδικασία εκτέλεσης Γενετικού Αλγορίθμου	39
4.3.2	Πλεονεκτήματα Γενετικών Αλγορίθμων	42
4.4	Παρουσίαση των βημάτων επίλυσης	43
4.4.1	Εισαγωγή.....	43
4.4.2	Αναλυτική παρουσίαση βημάτων	45
4.4.2.1	Εισαγωγή δεδομένων	46
4.4.2.2	Αξιολόγηση αρχικού δικτύου.....	47
4.4.2.3	Υπολογισμός αποστάσεων.....	48
4.4.2.4	Βελτιστοποίηση με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου.....	48
4.4.2.5	Αξιολόγηση τελικού δικτύου και υπολογισμός οχημάτων.....	50
4.4.2.6	Υπολογισμός κόστος κατασκευής ηλεκτρικού δικτύου.....	51
5	Πειράματα – Αποτελέσματα.....	53
5.1	Επίλυση δικτύου Mandl - 6 διαδρομών	53
5.2	Παρουσίαση Αποτελεσμάτων.....	54
5.3	Ανάλυση Ευαισθησίας Παραμέτρων	57
5.3.1	Ποσοστό κόστους ηλεκτρικού δικτύου	58
5.3.2	Κόστος σταθμών φόρτισης (€).....	61
5.3.3	Χωρητικότητα μπαταρίας (kWh)	64
5.3.4	Κατανάλωση ενέργειας (kWh/km)	67
5.4	Επίλυση δικτύου Mumford0 - 9 διαδρομών	70
5.4.1	Παρουσίαση Αποτελεσμάτων.....	71
5.5	Ανάλυση Αποτελεσμάτων.....	77
5.5.1	Δίκτυο Mandl	77
5.5.2	Δίκτυο Mumford0	78
6	Επίλογος.....	79
6.1	Συμπεράσματα.....	79
6.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	80
7	Βιβλιογραφία	81
8	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	84

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 4.1 – Πίνακας Προέλευσης – Προορισμού Mandl's	30
Πίνακας 4.2 – Πίνακας χρόνων διαδρομής Mandl's.....	30,31
Πίνακας 4.3 – Πίνακας Προέλευσης – Προορισμού Mumford0	34
Πίνακας 4.4 – Πίνακας χρόνων διαδρομής Mumford0	35
Πίνακας 4.5 – Κόστη κατασκευής γραμμών	37
Πίνακας 5.1 - Παράμετροι Προβλήματος	53
Πίνακας 5.2 – Παράμετροι Γενετικού Αλγορίθμου	53,54
Πίνακας 5.3 – Αρχικό Δίκτυο Mandl	54
Πίνακας 5.4 – Τελικό Δίκτυο Mandl.....	54
Πίνακας 5.5 – Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Βασικού Σεναρίου	55
Πίνακας 5.6 – Φορτίσεις Τελικού Δικτύου	56
Πίνακας 5.7 – Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Τελικού Δικτύου	57
Πίνακας 5.8 – Κόστος Τελικού Δικτύου	57
Πίνακας 5.9 – Αρχικό Δίκτυο Mandl	58
Πίνακας 5.10 – Τελικό Δίκτυο Mandl penalty2 = 0.6.....	58
Πίνακας 5.11 - Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης με penalty2 = 0.6.....	59
Πίνακας 5.12 – Φορτίσεις Τελικού Δικτύου για penalty2 = 0.6	60
Πίνακας 5.13 – Λειτουργικά χαρακτηριστικά τελικού δικτύου για penalty2 = 0.6.....	60
Πίνακας 5.14 – Κόστος Τελικού Δικτύου για penalty2 = 0.6	61
Πίνακας 5.15 – Αρχικό Δίκτυο Mandl	61
Πίνακας 5.16 – Τελικό Δίκτυο για $cost_{charging_stations} = 40000 \text{ €}$	61
Πίνακας 5.17 - Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης με $cost_{charging_stations} = 40000 \text{ €}$	62
Πίνακας 5.18 – Φορτίσεις Τελικού Δικτύου ($cost_{charging_stations} = 40000 \text{ €}$)	62
Πίνακας 5.19 – Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Τελικού Δικτύου ($cost_{charging_stations} = 40000 \text{ €}$).....	63
Πίνακας 5.20 – Κόστος Τελικού Δικτύου ($cost_{charging_stations} = 40000 \text{ €}$)	63,64
Πίνακας 5.21 – Αρχικό Δίκτυο Mandl	64
Πίνακας 5.22 – Τελικό Δίκτυο για $battery_{cap} = 60 \text{ kWh}$	64
Πίνακας 5.23 - Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης με $battery_{cap} = 60 \text{ kWh}$	64
Πίνακας 5.24 – Φορτίσεις Τελικού Δικτύου ($battery_{cap} = 60 \text{ kWh}$)	65

Πίνακας 5.25 - Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Τελικού Δικτύου ($\text{battery}_{\text{cap}} = 60 \text{ kWh}$).....	66,67
Πίνακας 5.26 – Κόστος Τελικού Δικτύου ($\text{battery}_{\text{cap}} = 60 \text{ kWh}$)	67
Πίνακας 5.27 – Αρχικό Δίκτυο Mandl	67
Πίνακας 5.28 – Τελικό Δίκτυο για $\text{energy}_{\text{cons}} = 2.0$	67
Πίνακας 5.29 - Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης με $\text{energy}_{\text{cons}} = 2.0$	68
Πίνακας 5.30 – Φορτίσεις Τελικού Δικτύου ($\text{energy}_{\text{cons}} = 2.0$)	69
Πίνακας 5.31 – Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Τελικού Δικτύου ($\text{energy}_{\text{cons}} = 2.0$).....	69,70
Πίνακας 5.32 – Κόστος Τελικού Δικτύου ($\text{energy}_{\text{cons}} = 2.0$)	70
Πίνακας 5.33 - Παράμετροι Προβλήματος	70
Πίνακας 5.34 – Παράμετροι Γενετικού Αλγορίθμου	70,71
Πίνακας 5.35 – Αρχικό δίκτυο Mumford0	71
Πίνακας 5.36 – Τελικό Δίκτυο Mumford0	71
Πίνακας 5.37 – Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης.....	73
Πίνακας 5.38 – Φορτίσεις Τελικού Δικτύου Mumford0	75
Πίνακας 5.39 – Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Τελικού Δικτύου Mumford0	76
Πίνακας 5.40 – Κόστος Τελικού Δικτύου Mumford0.....	76

Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 5.1 – Ποσοστά επιβατών αρχικού – τελικού δικτύου	56
Διάγραμμα 5.2 – Μέσος χρόνος διαδρομής αρχικού – τελικού δικτύου	56
Διάγραμμα 5.3 – Ποσοστά επιβατών αρχικού – τελικού δικτύου	60
Διάγραμμα 5.4 – Μέσος χρόνος διαδρομής αρχικού – τελικού δικτύου για $penalty2 = 0.6$	60
Διάγραμμα 5.5 – Ποσοστά επιβατών αρχικού – τελικού δικτύου ($cost_{charging_stations} = 40000$ €)	63
Διάγραμμα 5.6 – Μέσος χρόνος διαδρομής αρχικού – τελικού δικτύου ($cost_{charging_stations} = 40000$ €)	63
Διάγραμμα 5.7 – Ποσοστά επιβατών αρχικού – τελικού δικτύου ($battery_{cap} = 60$ kWh)	66
Διάγραμμα 5.8 – Μέσος χρόνος διαδρομής αρχικού – τελικού δικτύου ($battery_{cap} = 60$ kWh)	66
Διάγραμμα 5.9 – Ποσοστά επιβατών αρχικού – τελικού δικτύου ($energy_{cons} = 2.0$)	69
Διάγραμμα 5.10 – Μέσος χρόνος διαδρομής αρχικού – τελικού δικτύου ($energy_{cons} = 2.0$)	69
Διάγραμμα 5.11 – Ποσοστά επιβατών αρχικού – τελικού δικτύου Mumford0.....	74
Διάγραμμα 5.12 – Μέσος χρόνος διαδρομής αρχικού – τελικού δικτύου Mumford0.....	74

Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 4.1 – Mandl’s Swiss Road Network.....	29
Σχήμα 4.2 – Αρχικό δίκτυο Mandl.....	31
Σχήμα 4.3 – Mumford0 Road Network.....	33
Σχήμα 4.4 – Αρχικό δίκτυο Mumford0.....	36
Σχήμα 5.1 – Αρχικό Δίκτυο Mandl.....	55
Σχήμα 5.2 - Τελικό Δίκτυο Mandl.....	55
Σχήμα 5.3 – Αρχικό Δίκτυο Mandl.....	59
Σχήμα 5.4 – Τελικό Δίκτυο για $penalty2 = 0.6$	59
Σχήμα 5.5 – Αρχικό Δίκτυο Mandl.....	62
Σχήμα 5.6 – Τελικό Δίκτυο για $cost_{charging_stations} = 40000 \text{ €}$	62
Σχήμα 5.7 – Αρχικό δίκτυο Mandl.....	65
Σχήμα 5.8 – Τελικό Δίκτυο για $battery_{cap} = 60 \text{ kWh}$	65
Σχήμα 5.9 – Αρχικό Δίκτυο Mandl.....	68
Σχήμα 5.10 – Τελικό δίκτυο για $energy_{cons} = 2.0$	68
Σχήμα 5.11 – Αρχικό δίκτυο Mumford0.....	72
Σχήμα 5.12 – Τελικό δίκτυο Mumford0.....	73

Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 2.1 – Ηλεκτρικό λεωφορείο.....	10
Εικόνα 2.2 – Διάγραμμα ροής προτεινόμενης λύσης.....	22
Εικόνα 2.3 – Διάγραμμα ροής προγράμματος κατώτερου επιπέδου (LP).....	23
Εικόνα 4.1 – Τυπικό παράθυρο Spyder 3.7.....	38
Εικόνα 4.2 – Διασταύρωση (Crossover).....	40
Εικόνα 4.3 – Μετάλλαξη (Mutation).....	41
Εικόνα 4.4 – Διάγραμμα ροής γενετικού αλγορίθμου.....	41
Εικόνα 4.5 – Διάγραμμα ροής προγράμματος.....	44,45

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Οι αστικές συγκοινωνίες έκαναν την εμφάνισή τους στις αρχές του 19^{ου} αιώνα και από τότε αποτελούν υπηρεσίες ιδιαίτερης σημασίας για την κοινωνία. Τα αστικά λεωφορεία, συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν πρώτη φορά στα τέλη του 19^{ου} αιώνα στο Λονδίνο κι από τότε λειτουργούν σχεδόν σε όλες τις πόλεις του κόσμου. Στην αρχή τα λεωφορεία χρησιμοποιούσαν ως καύσιμο την βενζίνη, ωστόσο η χαμηλή τιμή του πετρελαίου ώθησε τους κατασκευαστές να την αντικαταστήσουν με πετρέλαιο. Τα τελευταία χρόνια γίνεται μια προσπάθεια να αντικατασταθούν τα πετρελαιοκίνητα λεωφορεία με ηλεκτρικά.

Ωστόσο, τα ηλεκτρικά λεωφορεία δεν είναι σύγχρονη εφεύρεση. Ιστορικά τα ηλεκτρικά λεωφορεία εμφανίζονται και να χάνονται από το σύστημα αστικών συγκοινωνιών ανά τον κόσμο (Hall et al., 2018). Τα πρώτα ηλεκτρικά λεωφορεία που εμφανίστηκαν ήταν τα τρόλεϋ της Siemens το 1882 με μια πρώτη υιοθέτησή τους στο Ηνωμένο Βασίλειο το 1909 (Brunton, 1992). Τα ηλεκτρικά λεωφορεία που εισάγονται στην κυκλοφορία είναι είτε με συσσωρευτές (battery electric buses) είτε υβριδικά (plug-in hybrid electric buses). Τα δύο (2) βασικά πλεονεκτήματα των ηλεκτρικών λεωφορείων είναι ότι δεν έχουν εκπομπές αερίων και δεν κάνουν πολύ θόρυβο. (Hall et al, 2018)

Τα σύγχρονα ηλεκτρικά λεωφορεία λειτουργούν με συσσωρευτές, οι οποίοι φορτίζονται στατικά ή μέσω ευκαιριακής φόρτισης (opportunity charging). Σε ό,τι αφορά στην τελευταία, πρόκειται για ασύρματη φόρτιση, η οποία υφίσταται ήδη εδώ και τουλάχιστον έναν αιώνα. Πράγματι, ήδη από το 1899, ο Νίκολα Τέσλα ξεκίνησε έρευνα για την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς τη χρήση καλωδίων στο Κολοράντο Σπρινγκς των Ηνωμένων Πολιτειών. Το 1961, ο John Schuder πρότεινε ένα διαδερμικό σύστημα ενέργειας για εμφυτευμένες συσκευές. Με την ασύρματη φόρτιση ενός μοντέλου αεροσκάφους, ο William Brown κατάφερε να κυρώσει την μεταφορά ενέργειας με μικροκύματα. Το 1968 προτάθηκε ένας ηλιακός δορυφόρος από τον Peter Glaser ως μία νέα μορφή μεταφοράς ενέργειας με μικροκύματα. Το 2007, ερευνητές του MIT κατάφεραν να μεταφέρουν ασύρματα ενέργεια 60 W σε απόσταση δύο (2) μέτρων (Sun et al., 2018).

Με βάση τις λειτουργικές αρχές της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας υπάρχουν τρεις (3) βασικές κατηγορίες (Zicheng Bi et al, 2016):

1. **Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία**, που χρησιμοποιείται σε μεγάλες αποστάσεις φόρτισης
2. **Ηλεκτρική επαγωγή**, που χρησιμοποιείται σε μικρές αποστάσεις φόρτισης
3. **Μαγνητική επαγωγή**, που χρησιμοποιείται σε μικρές αποστάσεις φόρτισης αλλά δεν είναι τόσο επιβλεβής όσο η ηλεκτρική επαγωγή για το ανθρώπινο σώμα.

Από τις τρεις (3) κατηγορίες, περαιτέρω έρευνα έχει γίνει στη μαγνητική επαγωγή η οποία μπορεί να διαχωριστεί σε δύο (2) κατηγορίες (Zicheng Bi et al, 2016):

1. **Στατική**, φόρτιση όταν το λεωφορείο δεν βρίσκεται σε κίνηση
2. **Δυναμική**, φόρτιση όταν το λεωφορείο βρίσκεται σε κίνηση.

1.2 Σκοπός διπλωματικής εργασίας

Ο σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μοντέλου βελτιστοποίησης επανασχεδιασμού δικτύου ηλεκτρικών λεωφορείων, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις διαδικασίες που είναι απαραίτητες προκειμένου να επιτευχθεί ένα τέτοιο αποτέλεσμα.

Επιμέρους αντικείμενα της εργασίας αποτελούν:

1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση
2. Ανάλυση της μεθοδολογίας σχεδιασμού
3. Δεδομένα του προβλήματος και η μεθοδολογία του γενετικού αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση
4. Αποτελέσματα πειραμάτων
5. Συμπεράσματα

Σε αυτό το πλαίσιο, αναπτύσσεται αλγόριθμος που πραγματοποιεί επανασχεδιασμό δικτύου αστικών συγκοινωνιών με δεδομένο ότι θα χρησιμοποιηθούν ηλεκτρικά λεωφορεία σε όποιες γραμμές είναι δυνατόν, τα οποία θα λειτουργούν με στατική φόρτιση. Στόχος του επανασχεδιασμού είναι η ελαχιστοποίηση του τόσο κόστους κατασκευής του δικτύου όσο και του κόστους των χρηστών που θα χρησιμοποιήσουν το καινούργιο δίκτυο.

1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από οκτώ κεφάλαια συμπεριλαμβανομένης και της εισαγωγής.

Το πρώτο (1^ο) κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας, όπου γίνεται αναφορά στον σκοπό της εργασίας.

Στο δεύτερο (2^ο) κεφάλαιο γίνεται ανασκόπηση της υφιστάμενης βιβλιογραφίας ως προς τα ηλεκτρικά λεωφορεία, τον επανασχεδιασμό δικτύου καθώς επίσης και το κόστος για την υλοποίηση ενός δικτύου με ηλεκτρικά λεωφορεία.

Το τρίτο (3^ο) κεφάλαιο περιλαμβάνει την ανάλυση της μεθοδολογίας της διπλωματικής εργασίας.

Στο τέταρτο (4^ο) κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δεδομένα του προβλήματος κι η υλοποίηση του προβλήματος στο προγραμματιστικό περιβάλλον Python.

Στο πέμπτο (5^ο) κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων καθώς και ο σχολιασμός τους.

Το έκτο (6^ο) κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα της εργασίας και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Στο έβδομο (7^ο) κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση όλης της βιβλιογραφίας που χρησιμοποιήθηκε.

Στο παράρτημα παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα αποτελέσματα απ' όλες τις δοκιμές που έγιναν.

2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Ηλεκτρικά Λεωφορεία

Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να διαχωριστούν σε δύο (2) κατηγορίες, τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (hybrid electric buses) και τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία (battery electric buses).

Τα **ηλεκτρικά λεωφορεία με μπαταρία** (battery electric buses) βασίζονται αποκλειστικά στην ενσωματωμένη μπαταρία για να μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια στην μηχανή. Έτσι, το εύρος λειτουργίας τους εξαρτάται από το μέγεθος της μπαταρίας, το οποίο με την σειρά του εξαρτάται από τον τύπο υποδομής φόρτισης. Το πλεονέκτημα αυτών των λεωφορείων είναι ότι έχουν μηδενική εκπομπή καυσαερίων, αλλά βασίζονται σε πολύ μεγάλο βαθμό στην μπαταρία. Επομένως, ανάλογα με το μέγεθος της μπαταρίας διαφορετική είναι και η μέγιστη απόσταση που μπορεί να διανύσει ένα ηλεκτρικό λεωφορείο. (Hall et al., 2018)

CATBUS

Clemson, SC



CITY OF ROCK HILL

Rock Hill, SC



Εικόνα 2.1 – Ηλεκτρικά λεωφορεία

(Πηγή – www.proterra.com/)

Τα **υβριδικά λεωφορεία** (hybrid buses) συνδυάζουν την μηχανή καύσης με τον ηλεκτρικό κινητήρα. Ο συνδυασμός αυτός μπορεί να γίνει είτε με παράλληλη σύνδεση είτε σε σειρά. Στην παράλληλη σύνδεση και οι δύο κινητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ώθηση. Αντίθετα, όταν η σύνδεση είναι σε σειρά υπάρχει ο ηλεκτρικός κινητήρας που χρησιμοποιείται για ώθηση του οχήματος αλλά και ο κινητήρας καύσης, ο οποίος χρησιμεύει ως γεννήτρια, παρέχοντας ηλεκτρική ενέργεια στον κινητήρα όταν δεν λειτουργεί με μπαταρία. Τα υβριδικά οχήματα υπάγονται σε έλεγχο κινητήρα, ο οποίος έχει μεγάλη επίπτωση στην απόδοσή του, στην κατανάλωση ενέργειας και στις εκπομπές αερίων. Στα υβριδικά λεωφορεία που έχουν την

δυνατότητα να λειτουργούν μόνο με τον ηλεκτρικό κινητήρα, ο χειριστής καλό θα ήταν να περιορίζει «πότε» και «που» το λεωφορείο να χρησιμοποιεί τον κινητήρα καύσης. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργούνται περιοχές με μηδενικούς ρύπους και θορύβους. (Hall et al., 2018)

2.1.1 Τρόποι φόρτισης

Οι Li (2016) και Olson et al. (2016), ανεξάρτητα από τον τύπο του ηλεκτρικού οχήματος διακρίνουν πέντε (5) μεθόδους φόρτισης.

1. **Φόρτιση σε αμαξοστάσιο** (charging at a depot). Αυτό το είδος φόρτισης μπορεί να γίνει είτε το βράδυ ή το πρωί στο αμαξοστάσιο, στην περίπτωση που το λεωφορείο λειτουργεί μόνο τις πρωινές και τις απογευματινές ώρες αιχμής. Για τα ηλεκτρικά λεωφορεία με μπαταρία, το μέγεθος της μπαταρίας θα πρέπει να επαρκεί για να λειτουργεί όλη την ημέρα ή μέρος της ημέρας.
2. **Περιστασιακή φόρτιση στους τερματικούς σταθμούς** (opportunity charging at end points). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν το λεωφορείο σταματήσει για κάποιο μεγάλο χρονικό διάστημα, πριν συνεχίσει την επόμενη διαδρομή. Το μέγεθος της μπαταρίας πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε σε περίπτωση καθυστέρησης να μπορεί να παραλείψει φόρτιση. Αν το λεωφορείο ξεκινήσει από το αμαξοστάσιο με πλήρως φορτισμένη την μπαταρία, μπορεί να επιστρέψει το απόγευμα με χαμηλό επίπεδο μπαταρίας, έτσι η περιστασιακή φόρτιση στους τερματικούς σταθμούς μπορούν να προγραμματίζονται ώστε να μην επαναφορτίζεται πλήρως η μπαταρία κατά την διάρκεια της ημέρας.
3. **Περιστασιακή φόρτιση σε στάσεις** (opportunity charging at bus stops). Χρησιμοποιείται για γρήγορη φόρτιση κατά την διάρκεια της εκτέλεσης του δρομολογίου. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κύρια πηγή φόρτισης των μπαταριών, με φορτιστές σε διάφορες στάσεις κατά την έκταση της δρομολογίου. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί κι ως εναλλακτική μονάδα φόρτισης εάν το λεωφορείο παρέλειψε την φόρτιση στον τερματικό σταθμό (**περιστασιακή φόρτιση στους τερματικούς σταθμούς**).
4. **Φόρτιση κατά την λειτουργία** (charging during driving). Είναι μια διαδικασία φόρτισης που μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους, όπως με εναέριες γραμμές ή με επαγωγική μεταφορά ενέργειας από την άσφαλατο. Στα υβριδικά ηλεκτρικά λεωφορεία αυτή η διαδικασία μπορεί να γίνει με φόρτιση μέσω της μηχανής εσωτερικής καύσης.
5. **Αλλαγή μπαταρίας** (battery swapping). Η αλλαγή της μπαταρίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διευρυνθεί το εύρος της απόστασης που μπορεί να διανύσει ένα ηλεκτρικό λεωφορείο. Μετά την αλλαγή της μπαταρίας το όχημα είναι πλήρως φορτισμένο και μπορεί να συνεχίσει την λειτουργία του. Με βάση τον Li (2016) το βασικό πρόβλημα αυτού του είδους φόρτισης είναι ότι η αλλαγή της μπαταρίας χρειάζεται μεγάλους χώρους για να πραγματοποιηθεί καθώς επίσης είναι και αρκετά ακριβή για να κατασκευαστούν.

Οι Hall et al. (2018) κάνουν διαφορετική διάκριση στους τρόπους φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Παρουσιάζουν τρεις (3) κατηγορίες φόρτισης, βασισμένοι στην ομαδοποίηση των Li (2016) και Olson et al. (2016).

1. **Γρήγορη φόρτιση** (quick charging). Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν όλα τα ήδη τεχνολογίας που επιτρέπουν την επαναφόρτιση μέσα σε λίγα λεπτά. Άρα, σε αυτήν την κατηγορία περιλαμβάνεται η **περιστασιακή φόρτιση στους τερματικούς σταθμούς** (opportunity charging at end points), η **περιστασιακή φόρτιση σε στάσεις** (opportunity charging at bus stops) και η **αλλαγή μπαταρίας** (battery swapping).
2. **Ολονύχτια φόρτιση** (overnight charging). Περιλαμβάνει οποιαδήποτε τεχνολογία που η διάρκεια φόρτισης είναι από τριάντα (30) λεπτά έως μερικές ώρες. Γίνεται η θεώρηση πως μία πλήρως φορτισμένη μπαταρία επιτρέπει στο λεωφορείο να λειτουργεί κανονικά για μια ολόκληρη ημέρα. Πρόκειται δηλαδή για **φόρτιση σε αμαξοστάσιο** (charging at a depot).
3. **Συνεχής φόρτιση** (continuous charging). Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει όλα τα ήδη τεχνολογίας που απαιτούν συνεχόμενη φόρτιση, όπως οι εναέριες γραμμές. Πρόκειται για **φόρτιση κατά την λειτουργία** (charging during driving).

Οι Lajunen και Liptman (2015) στην έρευνά τους για την αξιολόγηση του κόστους κύκλου ζωής και τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα για διάφορους τύπους λεωφορείων διέκριναν τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία στις εξής κατηγορίες:

1. **Ολονύχτια φόρτιση στο αμαξοστάσιο**
2. **Φόρτιση κατά τους τερματικούς σταθμούς ή σε στάσεις**
3. **Αλλαγή μπαταρίας**, αλλά απαιτεί μια σημαντική επένδυση στον σταθμό ανταλλαγής μπαταριών.

2.1.2 Μπαταρία

Τα ηλεκτρικά λεωφορεία με μπαταρία παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον καθώς όταν είναι ακινητοποιημένα, το ποσοστό ενέργειας που καταναλώνουν είναι χαμηλότερο συγκριτικά με τα πετρελαιοκίνητα λεωφορεία. Τα λειτουργικά ηλεκτρικά λεωφορεία που παρουσιάζονται στην Seoul και στο Los Angeles, είναι μοντέρνα ηλεκτρικά λεωφορεία τα οποία χρησιμοποιούν μπαταρίες λιθίου για αποθήκευση ενέργειας. Το βασικό πρόβλημα, όμως, με τα ηλεκτρικά οχήματα είναι το μεγάλο κόστος της μπαταρίας και των υποδομών φόρτισης.

Οι τεχνολογικές εξελίξεις έχουν κάνει τις μπαταρίες λιθίου να είναι η καλύτερη επιλογή για την αποθήκευση ενέργειας σε ηλεκτρικά λεωφορεία πόλεων. Οι μπαταρίες αυτές έχουν καλή αναλογία χωρητικότητας προς το βάρος, το οποίο επιτρέπει την χρήση τους για μία ολόκληρη ημέρα χωρίς επαναφόρτιση. Ωστόσο, χρειάζεται μεγάλα ποσοστά ενέργειας για να επιτευχθεί αυτό, γεγονός που αυξάνει το συνολικό βάρος και κόστος του λεωφορείου.

Εναλλακτικά, υπάρχουν και οι μπαταρίες υψηλής ισχύος με καλή αναλογία ισχύος προς βάρος. Αυτές οι μπαταρίες συνδυάζονται με γρήγορες μεθόδους φορτίσεων των μπαταριών, όπου η ισχύς που μεταφέρεται είναι χαμηλή και η φόρτιση γίνεται κατά την διάρκεια της ημέρας. Οι μπαταρίες με μεγάλο ποσοστό αποδοχής ισχύος χρησιμοποιούνται σε περιστασιακές φορτίσεις όπου η φόρτιση πρέπει να γίνει σε τουλάχιστον 30 sec. (Lajunen and Lipman, 2016)

Ανάλογα με την τρόπο φόρτισης επιλέγεται το μέγεθος της μπαταρίας, καθώς η ισχύς φόρτισης διαφέρει. Η **φόρτιση σε αμαξοστάσιο** (charging at a depot) χρειάζεται φορτιστές μικρότερης ισχύος μιας και η φόρτιση διαρκεί μεγάλο χρονικό διάστημα, αλλά ταυτόχρονα χρειάζονται μπαταρίες μεγάλης χωρητικότητας για να μπορούν να λειτουργούν για μεγάλα διαστήματα χωρίς φόρτιση. Η περιστασιακή φόρτιση (**περιστασιακή φόρτιση στους τερματικούς σταθμούς** - opportunity charging at end points, **περιστασιακή φόρτιση σε στάσεις** - opportunity charging at bus stops) αντίθετα, χρειάζεται φορτιστές μεγάλης ισχύος για να μπορούν να φορτίσουν την μπαταρία σε μικρό χρονικό διάστημα (30 – 60 sec) αλλά το μέγεθος των μπαταριών μπορεί να είναι μικρότερο. Στην **φόρτιση κατά την λειτουργία** (charging during driving), το μέγεθος της μπαταρίας εξαρτάται από το μήκος της ηλεκτρικής διαδρομής.

Στην **ολονύχτια φόρτιση** (overnight charging), με βάση τους Olsson et al. 2016, χρειάζονται φορτιστές μικρής ισχύος – περίπου 80 kWh ανά φόρτιση – καθώς πολλά λεωφορεία φορτίζονται στην ίδια περιοχή.

2.2 Μέγεθος μπαταρίας και Κατανάλωση ενέργειας

Οι Kunith et al. (2017), στην έρευνά τους χρησιμοποίησαν ένα δίκτυο στο Βερολίνο με δεκαεπτά (17) γραμμές, με κοινή αφετηρία, συνολικό μήκος διαδρομών τριακόσια πενήντα χιλιόμετρα (350 km) και εκατόν τριάντα τέσσερα (134) λεωφορεία. Καθόρισαν την κατανάλωση ενέργειας για κάθε διαδρομή ανάλογα με την απόσταση και τον χρόνο μεταξύ των στάσεων, με βάση τους διεθνείς κανονισμούς DIN 70030 (1989). Για κάθε διαδρομή ανατέθηκε κι ένας διαφορετικός τύπος λεωφορείου, τυπικό λεωφορείο δώδεκα μέτρων (12 m - SB), αρθρωτό λεωφορείο δεκαοκτώ μέτρων (18 m - AB) και διώροφο λεωφορείο (DD). Με βάση αυτά για κάθε διαδρομή υπολογίστηκε η χωρητικότητα της μπαταρίας που είναι απαραίτητη. Η έρευνα βασίστηκε στο ότι θα χρησιμοποιηθούν μπαταρίες λιθίου και υψηλής ισχύος ενέργεια. Κάποιοι τύποι μπαταριών προτιμούνται περισσότερο, όπως είναι οι μπαταρίες λιθίου – τιτανίου (LTO) ή οι μπαταρίες λιθίου – φωσφορικού σιδήρου (LFO). Στην ανάλυση που έκαναν, με βάση την κατανάλωση ενέργειας υπολόγισαν την χωρητικότητα της μπαταρίας για τους τρεις (3) τύπους λεωφορείων. Έτσι προέκυψε για τους διαφορετικούς τύπους λεωφορείων και για τις γραμμές οι εξής χωρητικότητες:

- 60, 90, 120 kWh για το τυπικό λεωφορείο δώδεκα μέτρων (12 m - SB)
- 90, 120, 150 kWh για το αρθρωτό λεωφορείο δεκαοκτώ μέτρων (18 m - AB) και όμοια για το διώροφο λεωφορείο (DD).

Η κατανάλωση ενέργειας ενός ηλεκτρικού λεωφορείου, εξαρτάται από το βάρος του φορτίου, τις καιρικές συνθήκες και την διαδρομή. Επειδή η κατανάλωση ενέργειας στα ηλεκτρικά λεωφορεία είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τα πετρελαιοκίνητα, η διακύμανσή της μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα στο κόστος του κύκλου ζωής των ηλεκτρικών λεωφορείων. Όταν λειτουργεί σε συνθήκες κρύου η κατανάλωση της ενέργειας μπορεί να αυξηθεί λόγω της χρήσης θέρμανσης, ειδικά αν η ενέργεια απορροφάται από την μπαταρία. Ωστόσο, έρευνες έχουν δείξει ότι οι καιρικές συνθήκες μπορούν να αντιμετωπιστούν με σωστό συνδυασμό φόρτισης ισχύος, διαστασιολόγηση μπαταρίας και περιστασιακή φόρτιση. (Lajunen, 2017)

Στην έρευνα των Kunith et al. (2017) προέκυψε ότι η κατανάλωση ενέργειας για την μπαταρία με την μεγαλύτερη χωρητικότητα (120 kWh για SB, 150 kWh για AB και DD) είναι ελάχιστα μεγαλύτερη από την μπαταρία μεσαίας χωρητικότητας (90 kWh και 120 kWh). Παρατηρείται μια μικρή αύξηση συγκριτικά με την αρχική τιμή (60 kWh και 90 kWh).

Οι Gao et al. (2017) έκαναν έρευνα σε ένα πραγματικό δίκτυο με ηλεκτρικά λεωφορεία, αποτελούμενο από οκτώ (8) λεωφορεία με λειτουργία δεκαεπτά (17) ώρες την ημέρα σε μία γραμμή είκοσι τεσσάρων (24) χιλιομέτρων. Οι μπαταρίες των ηλεκτρικών λεωφορείων είχαν χωρητικότητα από 60 – 548 kWh. Παρατήρησαν ότι για χωρητικότητα μπαταρίας 324 kWh και για ισχύ φορτιστή 91 kW, ο ελάχιστος χρόνος φόρτισης της μπαταρίας ήταν δύο ώρες (2 h). Ο μέσος ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας για ένα ηλεκτρικό λεωφορείο είναι 1,35 kWh/km, ενώ για ένα τυπικό λεωφορείο 1,80 kWh/km. Επίσης, με βάση την ανάλυση που έκαναν προέκυψε ότι μια μπαταρία με χωρητικότητα 60 kWh είναι ικανή να ικανοποιήσει γραμμές με μικρό μήκος διαδρομής.

Τελικά, καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η κατανάλωση ενέργειας για τα ηλεκτρικά λεωφορεία κυμαίνεται από 1,24 έως 2,48 kWh/km κι ως μέση τιμή θεωρούν το 1,35 kWh/km.

2.3 Σχεδιασμός Δικτύου Αστικών Συγκοινωνιών (Transit Route Network Design Problem -TRNDP)

Το πρόβλημα του σχεδιασμού δικτύου Αστικών Συγκοινωνιών (TRNDP) προσελκύει το ενδιαφέρον των ερευνητών από τα τέλη της δεκαετίας του '60. Ο σχεδιασμός δικτύου ασχολείται με τον καθορισμό της βέλτιστης υποδομής και λειτουργικών χαρακτηριστικών του Δικτύου Αστικών Συγκοινωνιών, με συγκεκριμένους στόχους σχεδιασμού, παραδοχές στην ζήτηση καθώς και οικονομικούς και λειτουργικούς περιορισμούς. Στην κατηγορία του σχεδιασμού συγκοινωνιών θεωρείται ένα από τα πιο δύσκολα και περίπλοκα προβλήματα.

Ο σχεδιασμός δικτύου Αστικών Συγκοινωνιών (TRNDP) γίνεται με την βελτιστοποίηση των στόχων σχεδιασμού και δίνει σαν αποτέλεσμα ένα δίκτυο διαδρομών. Συνήθως, μέσα στους σχεδιαστικούς στόχους είναι οι λειτουργικοί περιορισμοί και οι περιορισμοί των διαθέσιμων πόρων. Έχοντας ένα οδικό δίκτυο, τον Πίνακα Προέλευσης – Προορισμού και τους

περιορισμούς, το βέλτιστο δίκτυο διαδρομών καθορίζεται. Το βέλτιστο δίκτυο λαμβάνει υπόψη τις υποδομές των διαδρομών, τις συχνότητες, τους τύπους των λεωφορείων και τις στάσεις, καθώς όλα αποτελούν μεταβλητές σχεδιασμού του προβλήματος. (Keraptsoglou, 2020)

Οι μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος σχεδιασμού μπορούν να ενταχθούν σε τέσσερις (4) κατηγορίες και υποκατηγορίες:

1. Ευρετικές (Heuristics)
2. Αναλυτικές (Analytical methods)
3. Μαθηματικές (Mathematical methods)
4. Μεθευρετικές (Metaheuristics)

Στην αρχή, οι ευρετικές μέθοδοι (Heuristics) δεν ήταν ικανές να ανταπεξέλθουν σε μεγάλα δίκτυα και να παρουσιάσουν ακριβείς λύσεις, ωστόσο έθεσε τις βάσεις για την ανάπτυξη των μεθευρετικών (Metaheuristics) μεθόδων. Οι αναλυτικές μέθοδοι (Analytical methods) προσπάθησαν να καθορίσουν τα χαρακτηριστικά των γραμμών όπως είναι το μήκος διαδρομής.

Τα τελευταία χρόνια, οι μεθευρετικές μέθοδοι (Metaheuristics) είναι ο κύριος τρόπος λύσης των δύσκολων προβλημάτων βελτιστοποίησης και μπορούν να χωριστούν σε δύο (2) κατηγορίες:

1. Μοναδική λύση, βελτιώνει τη μοναδική υποψήφια λύση
2. Πληθυσμιακή λύση, διερευνά σε ένα εύρος υποψήφια λύσεων.

Όταν οι δύο (2) αυτές κατηγορίες συνδυάζονται για την επίλυση του προβλήματος σχεδιασμού, η μέθοδος ονομάζεται υβριδική (Hybrid method). (Keraptsoglou, 2020)

Ο σχεδιασμός του δικτύου Αστικών Συγκοινωνιών είναι σημαντικό να αντιμετωπιστεί με την χρήση στόλου ηλεκτρικών λεωφορείων (Electric Transit Route Network Design Problem – E-TRNDP).

2.4 Επανασχεδιασμός Δικτύου Αστικών Συγκοινωνιών (Public Transportation Network Redesign Problem - PTNRP)

Οι Fan και Machemehl (2011) χαρακτηρίζουν το πρόβλημα του σχεδιασμού – επανασχεδιασμού ως ένα στρατηγικό παιχνίδι Stackelberg. Διατυπώθηκε ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης δύο (2) επιπέδων, που αντικατοπτρίζει τους διαφορετικούς στόχους των δύο (2) μεταβλητών απόφασης, ο σχεδιαστής του δικτύου και ο χρήστης του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο, ο σχεδιαστής του δικτύου, που θεωρείται «αρχηγός», θεωρείται ότι ξέρει πως οι χρήστες, δηλαδή οι «ακόλουθοι», θα ανταποκριθούν σε οποιαδήποτε στρατηγική επιλέξει. Οι «ακόλουθοι» είναι ελεύθεροι να επιλέξουν οποιαδήποτε διαδρομή θελήσουν ώστε το συνολικό κόστος διαδρομής ή ο συνολικός χρόνος διαδρομής και ο αριθμός των μετεπιβιβάσεων να είναι ο ελάχιστος. Από

την άλλη ο «αρχηγός» πρέπει να κάνει την καλύτερη χρήση των περιορισμένων πόρων προκειμένου να βελτιστοποιήσει την απόδοση του συστήματος, ενώ ταυτόχρονα να λαμβάνουν υπόψη την συμπεριφορά των χρηστών. Ο προγραμματισμός του στοχαστικού διπλού επιπέδου μπορεί να παρουσιαστεί ως εξής:

$$(UP) \min_{\mu} F[\mu, \nu(\mu)] \quad (2.1)$$

Subject to,

$$G[\mu, \nu(\mu)] \leq 0, \text{ όπου η } \nu(\mu) \text{ ορίζεται ως } (LP) \min_{\mu} f[\mu, \nu(\mu)] \quad (2.2)$$

Subject to,

$$g[\mu, \nu(\mu)] \leq 0 \quad (2.3)$$

Όπου,

(UP) = πρόγραμμα ανώτερου επιπέδου (upper-level program)

(LP) = πρόγραμμα κατώτερου επιπέδου (lower-level program)

F = αντικειμενική συνάρτηση του προγράμματος ανώτερου επιπέδου (UP)

μ = μεταβλητές απόφασης του προγράμματος ανώτερου επιπέδου (UP)

G = περιορισμοί του προγράμματος ανώτερου επιπέδου (UP)

f = αντικειμενική συνάρτηση του προγράμματος κατώτερου επιπέδου

ν = μεταβλητές απόφασης του προγράμματος κατώτερου επιπέδου (LP)

g = περιορισμοί του προγράμματος κατώτερου επιπέδου (LP)

Το πρόβλημα του επανασχεδιασμού δικτύου (public transportation network redesign problem – PTNRP - AEI) γίνεται ελαχιστοποιώντας το κόστος των χρηστών, το κόστος του διαχειριστή καθώς και το κόστος των ανικανοποίητων χρηστών του υπάρχοντος δικτύου λαμβανομένου υπόψη και την συμπεριφορά των χρηστών του δικτύου.

Η μαθηματική παρουσίαση της αντικειμενικής συνάρτησης είναι:

$$\begin{aligned}
TC = & C_1 * \left(\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{r_m \in DR_{ij}} d_{ij}^{r_m} t_{ij}^{r_m} + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{t_r \in TR_{ij}} d_{ij}^{t_r} t_{ij}^{t_r} \right) + C_2 * \frac{C_v}{C_m} * \\
& O_v * \left(\sum_{m=1}^M \frac{T_{r_m}}{h_{r_m}} \right) + C_3 * \frac{C_d}{C_m} * \left(\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij} - \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{r_m \in DR_{ij}} d_{ij}^{r_m} - \right. \\
& \left. \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{t_r \in TR_{ij}} d_{ij}^{t_r} \right) \tag{2.4}
\end{aligned}$$

Όπου,

N = ο αριθμός των κεντροειδών του δικτύου

M = ο αριθμός των διαδρομών της λύσης για το προτεινόμενο δίκτυο,

r_m = η m διαδρομή της προτεινόμενης λύσης ($m = 1, \dots, M$)

$d_{ij}^{r_m}$ = η ζήτηση μεταξύ των κεντροειδών i, j της διαδρομής r_m

$d_{ij}^{t_r}$ = η ζήτηση μεταξύ των κεντροειδών i, j της διαδρομής της διαδρομής μετεπιβίβασης t_r

DR_{ij} = το σύνολο των διαδρομών με απευθείας εξυπηρέτησης της ζήτησης μεταξύ των κόμβων i, j

TR_{ij} = το σύνολο των μετεπιβιβάσεων που είναι απαραίτητες για να εξυπηρετηθεί η ζήτηση μεταξύ των κόμβων i, j

$t_{ij}^{r_m}$ = συνολικός χρόνος διαδρομής μεταξύ κεντροειδών i, j της διαδρομής r_m

$t_{ij}^{t_r}$ = συνολικός χρόνος διαδρομής μεταξύ κεντροειδών i, j της διαδρομής μετεπιβίβασης t_r

C_v = κόστος λειτουργίας λεωφορείου την ώρα (€/vehicle/h)

C_m = κόστος του χρόνου (€/min)

O_v = ώρες λειτουργίας του λεωφορείου κάθε γραμμής (h)

C_d = κόστος των ανικανοποίητων χρηστών (€/person)

C_1, C_2, C_3 : συντελεστές βαρύτητας, όπου $C_1 + C_2 + C_3 = 1$

Ο πρώτος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης πρόκειται για το συνολικό κόστος των χρηστών, συμπεριλαμβανομένου του κόστους των χρηστών που εξυπηρετούνται απευθείας και αυτών που εξυπηρετούνται με μετεπιβιβάσεις. Ο δεύτερος όρος είναι το συνολικό κόστος του διαχειριστή και ο τρίτος όρος αφορά στο κόστος που σχετίζεται με τους ανικανοποίητους χρήστες.

Μέσα στο κόστος του διαχειριστή συμπεριλαμβάνεται το κόστος λειτουργίας των απαιτούμενων λεωφορείων, ενώ το κόστος του χρήσης συμπεριλαμβάνει τέσσερις (4) μεταβλητές:

1. Το κόστος βαδίσματος στην στάση.
2. Το κόστος αναμονής.
3. Το κόστος μετεπιβίβασης.
4. Το κόστος του επιβάτη όση ώρα βρίσκεται εντός του οχήματος.

Τα C_1 , C_2 και C_3 είναι συντελεστές βαρύτητας των τριών όρων της αντικειμενικής συνάρτησης. Οι τιμές που παίρνουν οι συντελεστές αυτοί εξαρτώνται από την εμπειρία του σχεδιαστή και την κρίση του.

Στο πρόβλημα του επανασχεδιασμού (PTNRP – AEI) το υποπρόγραμμα ανώτερου επιπέδου (upper-level program – UP), παρουσιάζεται ως εξής:

$$\text{minimize TC} \quad (2.4)$$

$$D_{\min} \leq D_{r_m} \leq D_{\max}, r_m \in R \quad (2.5)$$

$$M \leq R_m \quad (2.6)$$

$$h_{\min} \leq h_{r_m} \leq h_{\max}, r_m \in R \quad (2.7)$$

$$L_{r_m} = \frac{Q_{r_m}^{\max} * h_{r_m}}{p} \leq L_{\max}, r_m \in R \quad (2.8)$$

$$\sum_{m=1}^M N_{r_m} = \sum_{m=1}^n \frac{Tr_m}{hr_m} \leq w, r_m \in R \quad (2.9)$$

$$\max_{i,j} \left\{ \frac{t_{ij}^{R,TN}}{t_{ij}^{CTN}} \right\} \leq EQ, \forall i \in N, \forall j \in N \quad (2.10)$$

Όπου,

R = διαδρομές

R_{\max} = ο μέγιστος επιτρεπτός αριθμός διαδρομών του δικτύου

M = ο αριθμός των διαδρομών του προτεινόμενου δικτύου

D_{max} = το μέγιστο μήκος διαδρομής

D_{min} = το ελάχιστο μήκος διαδρομής

d_{ij} = συνολική ζήτηση μεταξύ των κεντροειδών i, j

t_{ij}^{RTN} = ο ελάχιστος χρόνος διαδρομής μεταξύ των κεντροειδών i, j με τον ελάχιστο αριθμό μετεπιβιβάσεων στο επανασχεδιασμένο δίκτυο

t_{ij}^{CTN} = ο ελάχιστος συνολικός χρόνος διαδρομής μεταξύ των κεντροειδών i, j

EQ = η αναλογία που καθορίζεται από τον σχεδιαστή κατά την διάρκεια του επανασχεδιασμού

h_{max} = η μέγιστη χρονοαπόσταση που απαιτείται για κάθε διαδρομή

h_{min} = η ελάχιστη χρονοαπόσταση που απαιτείται για κάθε διαδρομή

L_{max} = ο μέγιστος αριθμός φορτίου για οποιαδήποτε διαδρομή

P = η χωρητικότητα των καθισμάτων ενός λεωφορείου

W = ο μέγιστος αριθμός στόλου που είναι διαθέσιμος για λειτουργία

h_{r_m} = η χρονοαπόσταση των λεωφορείων στην γραμμή r_m ($h/vehicle$)

$N_{r_m} = \frac{Tr_m}{h_{r_m}}$ = ο αριθμός των απαιτούμενων λειτουργικών λεωφορείων της γραμμής r_m

L_{r_m} = συντελεστής φορτίου της γραμμής r_m

$Tr_m = \frac{2 * Dr_m}{V_b}$ = ο χρόνος κύκλου της γραμμής r_m

Dr_m = το συνολικό μήκος της διαδρομής r_m

V_b = μέση ταχύτητα λεωφορείου

$Q_{r_m}^{max}$ = η μέγιστη ζήτηση στην γραμμή r_m

Το πρόβλημα του ανώτερου επιπέδου είναι η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης (2.4), δηλαδή η ελαχιστοποίηση του κόστους. Ο πρώτος περιορισμός (2.5) έχει να κάνει με το μήκος της διαδρομής. Με αυτόν τον τρόπο αποτρέπεται το μήκος των γραμμών να είναι πολύ μεγάλο, αφού ο χρονοπρογραμματισμός των λεωφορείων σε μεγάλοι μήκους γραμμές είναι δύσκολο να τηρηθεί. Ο δεύτερος περιορισμός (2.6) έχει να κάνει με τον μέγιστο αριθμό διαδρομών, γιατί όταν επιλύεται PTNRP – AEI οι σχεδιαστές ορίζουν έναν μέγιστο αριθμό διαδρομών με βάση το πλήθος του στόλου, που έχει μεγάλη επίδραση στις βάρδιες των οδηγών.

Ο τρίτος περιορισμός (2.7) είναι η εφικτή χρονοαπόσταση, η οποία απεικονίζει την απαραίτητη χρήση της πολιτικής των χρονοαποστάσεων σε ακραίες περιπτώσεις. Ο τέταρτος περιορισμός (2.8) έχει να κάνει με τον συντελεστή φορτίου, που εγγυάται ότι η μέγιστη ζήτηση της κρίσιμης διαδρομής r_m ικανοποιείται από την χωρητικότητα του λεωφορείου. Ο πέμπτος περιορισμός (2.9) έχει να κάνει με τους πόρους του διαχειριστή και εγγυάται ότι σε κανένα από τα παραγόμενα δίκτυα δεν θα χρησιμοποιούνται περισσότερα οχήματα απ' ότι είναι διαθέσιμα. Ο τελευταίος περιορισμός (2.10) αντικατοπτρίζει την κοινωνική δικαιοσύνη, ώστε η μέγιστη ζήτηση κάθε ζεύγους προέλευσης – προορισμού να ικανοποιείται από την διαδικασία του επανασχεδιασμού.

Το δεύτερο επίπεδο, το υποπρόγραμμα κατώτερου επιπέδου (lower-level program LP) παρουσιάζεται ως εξής:

$$\min_{ij} t_{ij}^{RTN}(R_M) \quad (2.11)$$

$$t_{ij}^{RTN} \leq t_{ij}^{r_m}, \forall i \in N, \forall j \in N, r_m \in DR_{ij} \quad (2.12)$$

$$t_{ij}^{RTN} \leq t_{ij}^{t_r}, \forall i \in N, \forall j \in N, t_r \in TR_j \quad (2.13)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{r_m \in DR_{ij}} d_{ij}^{r_m} + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{t_r \in TR_{ij}} d_{ij}^{t_r} \leq \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij} \quad (2.14)$$

Όπου,

$t_{ij}^{r_m}$ = συνολικός χρόνος διαδρομής μεταξύ κεντροειδών i, j της διαδρομής r_m

$t_{ij}^{t_r}$ = συνολικός χρόνος διαδρομής μεταξύ κεντροειδών i, j της διαδρομής μετεπιβίβασης t_r

$d_{ij}^{r_m}$ = η ζήτηση μεταξύ των κεντροειδών i, j της διαδρομής r_m

$d_{ij}^{t_r}$ = η ζήτηση μεταξύ των κεντροειδών i, j της διαδρομής της διαδρομής μετεπιβίβασης t_r

DR_{ij} = το σύνολο των διαδρομών με απευθείας εξυπηρέτησης της ζήτησης μεταξύ των κόμβων i, j

TR_{ij} = το σύνολο των μετεπιβιβάσεων που είναι απαραίτητες για να εξυπηρετηθεί η ζήτηση μεταξύ των κόμβων i, j

Το πρόβλημα του κατώτερου επιπέδου, πρόκειται για ένα πρόγραμμα βέλτιστης αυτο-διαδρομολόγησης, με το οποίο οι χρήστες προσπαθούν να βρουν την διαδρομή με την οποία ελαχιστοποιείται το κόστος διαδρομής (ή το κόστος του χρόνου) καθώς και ο αριθμός των

απαραίτητων μετεπιβιβάσεων στο καινούργιο δίκτυο. Ο πρώτος και ο δεύτερος περιορισμός (2.12), (2.13) βεβαιώνει ότι ο ελάχιστος χρόνος διαδρομής μεταξύ δύο κεντροειδών i, j στο επανασχεδιασμένο δίκτυο είναι ο ελάχιστος από τους διαθέσιμους χρόνους για απευθείας μετακίνηση ή μέσω μετεπιβιβάσεων. Ο τρίτος περιορισμός (2.14) αναφέρεται στο γεγονός ότι δεν είναι δυνατόν να εξυπηρετηθούν όλοι οι χρήστες με απευθείας μετακίνηση με το επανασχεδιασμένο δίκτυο.

Η εικόνα 2.2 παρουσιάζει το διάγραμμα ροής της προτεινόμενης λύσης, που αποτελείται από δύο κύριες συνιστώσες:

1. Την αρχική διαδικασία για την δημιουργία υποψήφιων συνόλων διαδρομών για την δημιουργία όλων των εφικτών διαδρομών που ενσωματώνουν τις πρακτικές οδηγίες των βιομηχανιών και ικανοποιούν όλους τους περιορισμούς χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο των συντομότερων διαδρομών Dijkstra ή τον αλγόριθμο Yen's.
2. Ο γενετικός αλγόριθμος, για την εύρεση της βέλτιστης λύσης του PTNRP – AEI, που συντονίζει το πρόγραμμα ανώτερου - κατώτερου επιπέδου, δημιουργεί και ενημερώνει την βέλτιστη λύση για το καινούργιο δίκτυο που θα δημιουργηθεί από την διαδικασία του.

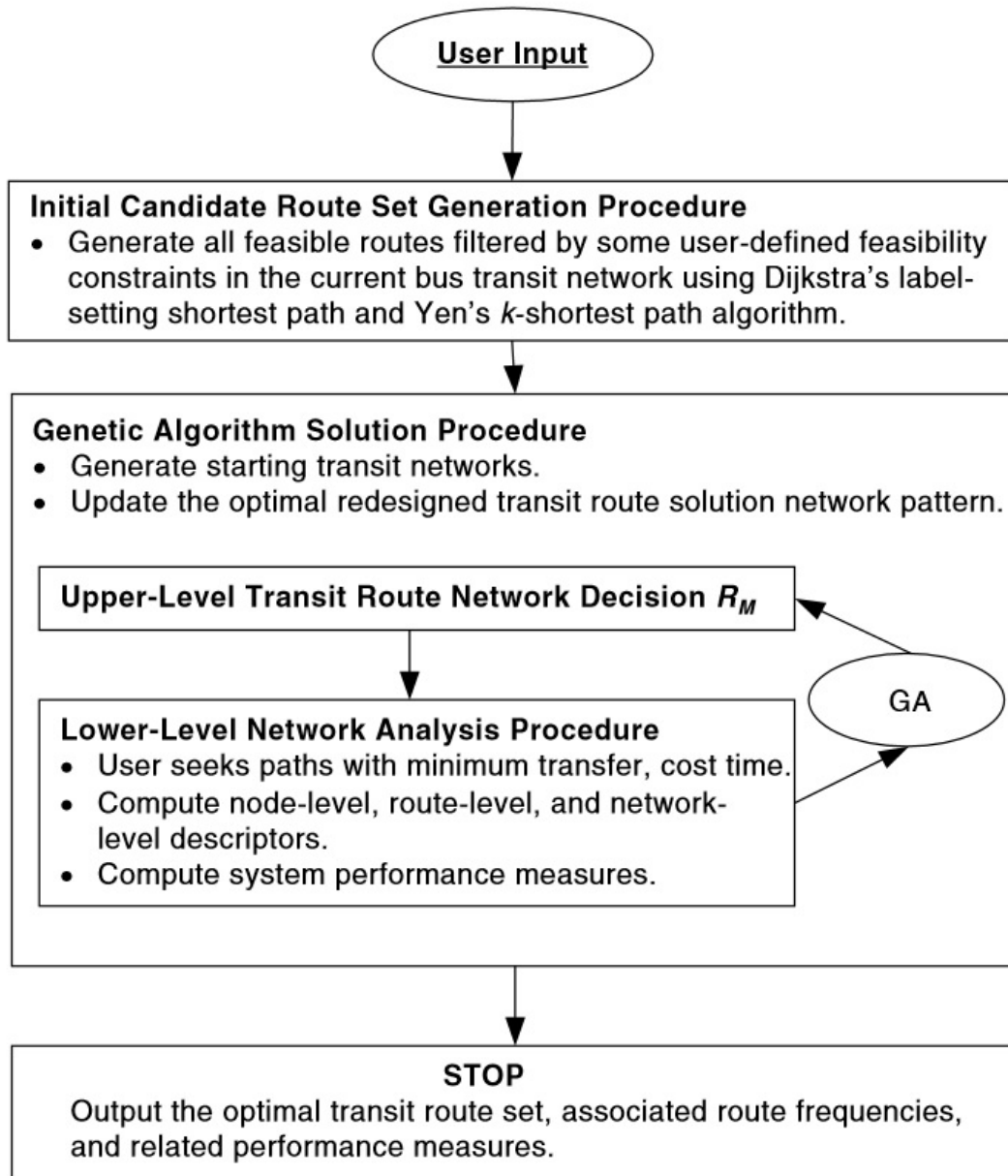


FIGURE 1 Flowchart of proposed solution methodology.

Εικόνα 2.2 – Διάγραμμα ροής προτεινόμενης λύσης

Πηγή: Fan and Machemehl, 2011

Η εικόνα 2.3 παρουσιάζει το διάγραμμα ροής για την ανάλυση του κατώτερου επιπέδου ως κρίσιμη διαδικασία του PTNRP – AEI με μεταβλητή την ζήτηση για την αξιολόγηση του εναλλακτικού δικτύου δικτύου με βάση τον επανασχεδιασμό.

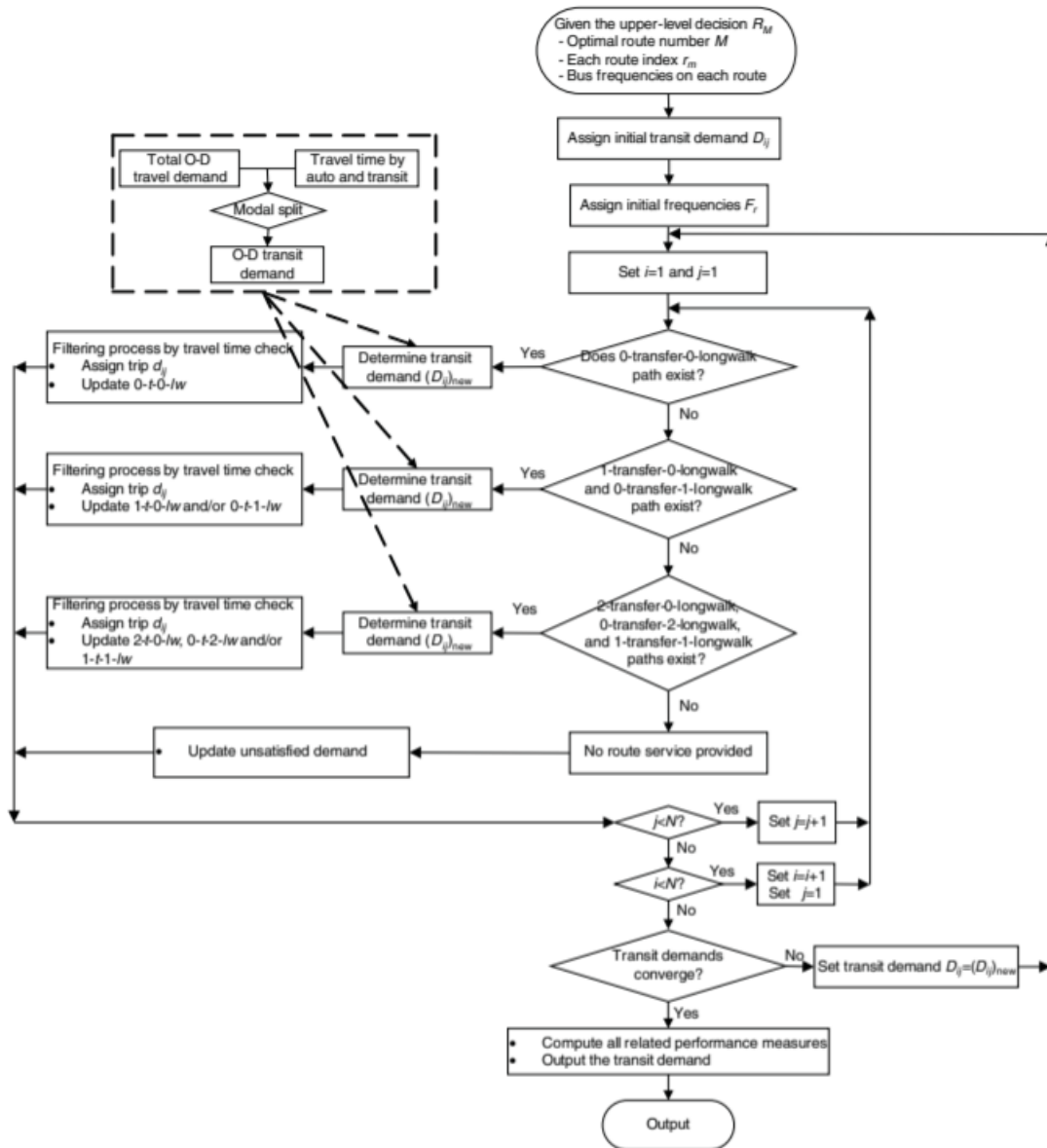


FIGURE 2 Lower-level network analysis procedure for PTNRP-AEI.

Εικόνα 2.3 – Διάγραμμα ροής προγράμματος κατώτερου επιπέδου (LP)

Πηγή: Fan and Machemehl, 2011

2.5 Κόστος

Για να μπορέσει να γίνει αξιολόγηση ενός δικτύου πρέπει να ληφθούν υπόψη οι υπάρχουσες τιμές της αγοράς των υλικών που είναι απαραίτητα.

Οι Lainans et al. (2015) στην έρευνά τους για τις οικονομικές επιπτώσεις που θα είχαν οι δύο τύποι λεωφορείων, ηλεκτροκίνητα και πετρελαιοκίνητα, στην περιφερειακή ανάπτυξη αναφέρουν:

1. Το εύρος του κόστους των πετρελαιοκίνητων λεωφορείων είναι από 220.000 € έως 380.000 €. Μία μέση τιμή θεωρήθηκε 332.500 € (Rigas, 2013).
2. Το κόστος των ηλεκτρικών λεωφορείων έχει μεγάλο εύρος από 350.000 € (Nottingham City Council Electric Link Buses, 2014) έως 800.000 € (He, 2013). Θεώρησαν ως μία μέση τιμή τα 550.000 €, η ίδια θεώρηση έγινε κι από άλλους ερευνητές (Cooney, 2011).
3. Μία μέση τιμή κόστους για την μπαταρία των ηλεκτρικών οχημάτων είναι 600 €/kW (Ernst et al, 2011) και αναμένουν μείωση στο μέλλον.

Οι Fusco et al., 2012 στην οικονομική ανάλυση της έρευνά τους αναφέρουν:

1. Το κόστος του μέσου χρήστη είναι 7 - 10 €/h
2. Το κόστος εγκατάστασης φορτιστών είναι 30.000 € ανά στάση λεωφορείου και ένα επιπλέον κόστος ανάλογα με την ισχύ του φορτιστή 100 €/kW.

Οι Jang et al., 2016 αναφέρουν:

1. Το κόστος της μπαταρίας των ηλεκτρικών λεωφορείων είναι από 500 \$ έως 800 \$
2. Το κόστος των σταθμών φόρτισης είναι 50.000 \$/ανά μονάδα έως 60.000 \$/ανά μονάδα

Ο Lajunen, 2017 στην έρευνά του για το κόστος του κύκλου ζωής και των απαιτήσεων φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων αναφέρει:

1. Το κόστος των πετρελαιοκίνητων λεωφορείων είναι 225.000 €
2. Το κόστος των ηλεκτρικών λεωφορείων χωρίς μπαταρία είναι 350.000 €
3. Το κόστος της μπαταρίας 800 €/kWh

2.6 Σύνοψη ευρημάτων

Αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζει τη διεθνή βιβλιογραφία για τα ηλεκτρικά λεωφορεία. Συγκεκριμένα, έγινε αναφορά στις δύο (2) κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται τα ηλεκτρικά λεωφορεία καθώς και στους διάφορους τρόπους φόρτισής τους. Έγινε μία παρουσίαση για τις μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα και πως συνδέονται με τον τρόπο φόρτισης. Παρουσιάστηκαν κάποια παραδείγματα για το μέγεθος της μπαταρίας μέσα από άλλες μελέτες. Επίσης, έγινε αναφορά στον σχεδιασμό δικτύου Αστικών Συγκοινωνιών και τις διάφορες μεθόδους επίλυσης του σχεδιασμού δικτύου αστικών συγκοινωνιών που υπάρχουν. Τέλος, έγινε αναλυτική παρουσίαση του προβλήματος του επανασχεδιασμού δικτύου. Στη συνέχεια της εργασίας, θα γίνει μία προσπάθεια επίλυσης του προβλήματος του επανασχεδιασμού των Αστικών Συγκοινωνιών με τη χρήση ηλεκτρικών λεωφορείων. Ο επανασχεδιασμός του δικτύου θα γίνει με βάση την ελαχιστοποίηση του κόστους, τόσο των χρηστών όσο και του χειριστή.

3 Μεθοδολογία

3.1 Εισαγωγή

Το πρόβλημα του επανασχεδιασμού δικτύου Αστικών Συγκοινωνιών και η τοποθέτηση φορτιστών σε κατάλληλες θέσεις, θα επιλυθεί με την μέθοδο του ακέραιου, μη γραμμικού προγραμματισμού.

Επομένως, είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί ένα μαθηματικό μοντέλο, στο οποίο η αντικειμενική συνάρτηση, από ένα ευρύτερο σύνολο λύσεων θα μπορεί να εντοπίσει την βέλτιστη λύση του προβλήματος λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που έχουν επιβληθεί σε αυτήν.

3.2 Αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται ως το σταθμισμένο άθροισμα του κόστους για την υλοποίηση του ηλεκτρικού δικτύου, του κόστους των επιβατών που εξυπηρετούνται με βάση τον χρόνο διαδρομής αλλά και του κόστους των επιβατών που μένουν ανικανοποίητοι από το δίκτυο. Επομένως, πρόκειται για ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης κόστους. Η αντικειμενική συνάρτηση είναι:

$$\min Z = w_1 * (8 * ATT + 80 * d_{un}) + w_2 * total_cost \quad (3.1)$$

Όπου,

w_1 = ποσοστό συμμετοχής κόστους επιβατών

ATT = συνολικός χρόνος μετακίνησης επιβατών

d_{un} = αριθμός ανικανοποίητων επιβατών (που χρειάζονται πάνω από δύο μετακινήσεις)

w_2 = ποσοστό συμμετοχής κόστους ηλεκτρικού δικτύου

$total_cost$ = συνολικό κόστος για την δημιουργία ηλεκτρικού δικτύου

Ποσοστό συμμετοχής κόστους επιβατών: Χρησιμοποιείται ως συντελεστής βαρύτητας για την συμμετοχή του κόστους των επιβατών, τόσο των ικανοποιημένων όσο και των ανικανοποίητων, στην επιλογή της βέλτιστης λύσης. Στο συγκεκριμένο δίκτυο, για τα διάφορα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, πήρε την τιμή 0,8.

Συνολικός χρόνος μετακίνησης επιβατών: Πρόκειται για το συνολικό άθροισμα των χρόνων διαδρομής, συμπεριλαμβανομένου και της ποινής μετεπιβίβασης όπου αυτό είναι απαραίτητο.

Αριθμός ανικανοποίητων επιβατών: Οι επιβάτες διακρίνονται σε τέσσερις (4) κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο εξυπηρέτησή τους από το δίκτυο. Στην αντικειμενική συνάρτηση

λαμβάνονται υπόψη οι ανικανοποίητοι επιβάτες, αφού οι επιβάτες από τις άλλες τρεις (3) κατηγορίες περιλαμβάνονται στον χρόνο μετακίνησης των επιβατών.

Ποσοστό συμμετοχής κόστους ηλεκτρικού δικτύου: Χρησιμοποιείται, επίσης, ως συντελεστής βαρύτητας για την συμμετοχή του κόστους δημιουργίας ηλεκτρικού δικτύου. Για την συγκεκριμένη εργασία θεωρήθηκε ότι ο συντελεστής βαρύτητας του ηλεκτρικού δικτύου δεν είναι τόσο σημαντικός όσο η εξυπηρέτηση των επιβατών, γι' αυτό τον λόγο πήρε την τιμή 0,5.

Συνολικό κόστος ηλεκτρικού δικτύου: Στο συνολικό κόστος λαμβάνεται υπόψη το κόστος για την αγορά λεωφορείων και των μπαταριών τους, καθώς και το κόστος για τους σταθμούς φόρτισης που είναι απαραίτητο να δημιουργηθούν ώστε το δίκτυο να είναι λειτουργικό.

3.3 Περιορισμοί

Οι περιορισμοί υπάρχουν προκειμένου να περιοριστεί το εύρος των εφικτών λύσεων του προβλήματος. Οι περιορισμοί διαχωρίζονται σε ανελαστικούς (hard constraints), που δεν μπορούν να παραβιαστούν σε καμία περίπτωση, και σε ελαστικούς (soft constraints), που μπορούν να παραβιαστούν αλλά υπάρχει κάποια ποινή (penalty function). (Griva et al, 2009) Προκύπτουν λαμβανομένου υπόψη τις παραμέτρους σχετικά με τον επανασχεδιασμό και την λειτουργία του δικτύου. Οι παράμετροι είναι:

1. **Μήκος γραμμών:** Οι λεωφορειακές γραμμές δεν θα πρέπει να υπερβαίνουν κάποιο συγκεκριμένο μήκος διαδρομής. Σαν κριτήριο για τον περιορισμό του μήκους διαδρομής χρησιμοποιήθηκε ο αριθμός των στάσεων S_i , των ελάχιστων (S_{min}) και των μέγιστων (S_{max}) που έχει οριστεί.

Για το δίκτυο **Mandl** έχει οριστεί ως τέσσερα (4) και οκτώ (8) αντίστοιχα.

Για το δίκτυο **Mumford0** έχει οριστεί ως τέσσερα (4) και δεκαπέντε (15) αντίστοιχα.

$$S_{min} \leq S_i \leq S_{max} \quad (3.2)$$

2. **Ομοιότητα γραμμών:** Κάθε γραμμή l_i του δικτύου δεν πρέπει να είναι ίδια με οποιαδήποτε άλλη l_j .

$$l_i \neq l_j \quad \forall i, j \in L \quad (3.3)$$

3. **Εξυπηρέτηση επιβατών:** Το αθροισμα των επιβατών από κάθε κατηγορία είναι ίσο με το συνολικό αριθμό των επιβατών, με βάση των πίνακα Προέλευσης – Προορισμού. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η εξυπηρέτηση όλων των επιβατών από το δίκτυο.

$$d_0 + d_1 + d_2 + d_{un} = d_{total} \quad (3.4)$$

4. **Μέγεθος οχημάτων:** Θα χρησιμοποιηθούν δύο τύποι λεωφορείων. Τα συνήθη λεωφορεία (N) χωρητικότητας 80 θέσεων και τα αρθρωτά (A) χωρητικότητας 150 θέσεων.

$$C_N = 80 \text{ επιβατών} \quad (3.5)$$

$$C_A = 150 \text{ επιβατών} \quad (3.6)$$

5. **Συχνότητες λεωφορείων:** Σε μία γραμμή που εξυπηρετείται από τυπικά λεωφορεία (N) η συχνότητα πρέπει να είναι μεταξύ των ελάχιστων ($f_{\min,N}$) και των μέγιστων ορίων ($f_{\max,N}$), δηλαδή δύο (2) και δώδεκα (12) οχήματα την ώρα αντίστοιχα.

Αν μια γραμμή εξυπηρετείται από αρθρωτά λεωφορεία (A) η συχνότητα πρέπει να είναι επίσης μεταξύ των ελάχιστων ($f_{\min,A}$) και μέγιστων ορίων ($f_{\max,A}$). Στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι επτά (7) και είκοσι (20) οχήματα την ώρα, αντίστοιχα.

$$f_{\min,N} \leq f_{i,N} \leq f_{\max,N} \quad (3.7)$$

$$f_{\min,A} \leq f_{i,A} \leq f_{\max,A} \quad (3.8)$$

6. **Δημιουργία ηλεκτρικού δικτύου:** Ηλεκτρικά λεωφορεία θα μπουν σε γραμμές όπου το μήκος τους είναι μικρότερο ή ίσο της μέγιστης απόστασης που μπορεί να διανύσει ένα λεωφορείο με συγκεκριμένη χωρητικότητα μπαταρίας και κατανάλωση ενέργειας.

$$d_i \leq d_{\max} \quad \forall i \in L \quad (3.9)$$

Από την φύση του προβλήματος σχεδόν όλοι οι περιορισμοί μπορούν να χαρακτηριστούν ως ανελαστικοί (hard constraints).

Ο περιορισμός ως προς το **μήκος της γραμμής** (3.2) μπορεί να θεωρηθεί ως ελαστικός (soft constraints), καθώς η λύση μπορεί να επηρεάσει το μήκος της γραμμής και να μειώσει το μήκος της γραμμής μέχρι ένα όριο μικρότερο του S_{\min} , ωστόσο ο περιορισμός του μέγιστου μήκους είναι ανελαστικός (hard constraints), καθώς αυτές οι γραμμές δεν θεωρούνται εφικτές και αποκλείονται από την επίλυση.

Ο περιορισμός της **ομοιότητας των γραμμών** (3.3) είναι ανελαστικός (hard constraints).

Ο περιορισμός για την **εξυπηρέτηση των επιβατών** (3.4) σε κάθε επιμέρους όρο είναι ελαστικός (soft constraints), ενώ στο σύνολό του είναι αυστηρά ανελαστικός (hard constraints). Λόγω του μικρού δικτύου, θεωρείται ότι οι επιβάτες εξυπηρετούνται πλήρως από το δίκτυο, επομένως κατά την επίλυση αυστηροποιήθηκε ο περιορισμός ως προς τους ανικανοποίητους επιβάτες. Σε μεγαλύτερα δίκτυα αυτός ο περιορισμός θα ήταν ελαστικός (soft constraints), διότι αλλιώς αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε αδύνατο επανασχεδιασμό δικτύου.

Ο περιορισμός του **μεγέθους των οχημάτων** (3.5), (3.6) είναι αυστηρά ανελαστικός (hard constraints), καθώς δεν μπορεί να αλλάξει η χωρητικότητα των λεωφορείων.

Ο περιορισμός για την **συχνότητα των λεωφορείων** (3.7), (3.8) είναι και των δύο ειδών. Συγκεκριμένα, για την ελάχιστη συχνότητα των τυπικών λεωφορείων ($f_{\min,N}$) αλλά και για την μέγιστη συχνότητα των αρθρωτών λεωφορείων ($f_{\max,A}$) ο περιορισμός είναι ανελαστικός (hard constraints). Αντίθετα, για την ελάχιστη συχνότητα των αρθρωτών λεωφορείων ($f_{\min,A}$) αλλά και για την μέγιστη συχνότητα των τυπικών λεωφορείων ($f_{\max,N}$) ο περιορισμός είναι ελαστικός (soft constraints), διότι στα συγκεκριμένα όρια μπορεί να αλλάξει ο τύπος του οχήματος.

Τέλος, ο περιορισμός για την **δημιουργία ηλεκτρικού δικτύου** (3.9) είναι ανελαστικός (hard constraints). Για την απλοποίηση του κώδικα όπου η μέγιστη απόσταση που μπορεί να διανύσει με την μπαταρία του, χωρίς περαιτέρω φόρτιση, είναι μικρότερη από το συνολικό μήκος της γραμμής τότε η συγκεκριμένη γραμμή θα εξυπηρετείται από κανονικά λεωφορεία κι όχι ηλεκτρικά. Λόγω, όμως του μικρού δικτύου αυτός ο περιορισμός είναι πολύ δύσκολο να χρησιμοποιηθεί. Σε μεγαλύτερα δίκτυα θα είχε περισσότερη ισχύ.

3.4 Ποινές

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, όταν υπάρχει υπέρβαση περιορισμού επιβάλλεται κι η αντίστοιχη ποινή (penalty function). Για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης εργασίας οι ποινές διαχωρίζονται σε δύο (2) βασικές κατηγορίες.

1. **Λογικές ποινές:** Χρησιμοποιούνται στους ανελαστικούς περιορισμούς. Πρόκειται για λογικές μεταβλητές οι οποίες ελέγχουν αν κάποια λύση ή έστω κάποιο υποκομμάτι της λύσης υπερβαίνει τον περιορισμό, τότε η συγκεκριμένη λύση απορρίπτεται ή το υποκομμάτι αυτό δεν συμπεριλαμβάνεται στο τελικό αποτέλεσμα.
2. **Αριθμητικές ποινές:** Χρησιμοποιούνται και στις δύο (2) κατηγορίες των περιορισμών με διαφορετικό τρόπο σε κάθε μία. Στην περίπτωση των ελαστικών περιορισμών είναι κάποιος αριθμός που είτε προστίθεται είτε πολλαπλασιάζεται με τον όρο που υπερβαίνει τον περιορισμό προκειμένου να αυξήσει την τιμή του στην αντικειμενική συνάρτηση. Στην περίπτωση των ανελαστικών περιορισμών, κανονικά δεν υπάρχει καμία τιμή, αλλά στον κώδικα που αναπτύχθηκε ο όρος που υπέρβαινε τον περιορισμό πολλαπλασιαζόταν με το άπειρο ($+\infty$) προκειμένου η συγκεκριμένη λύση να βγει από το σύνολο των λύσεων.

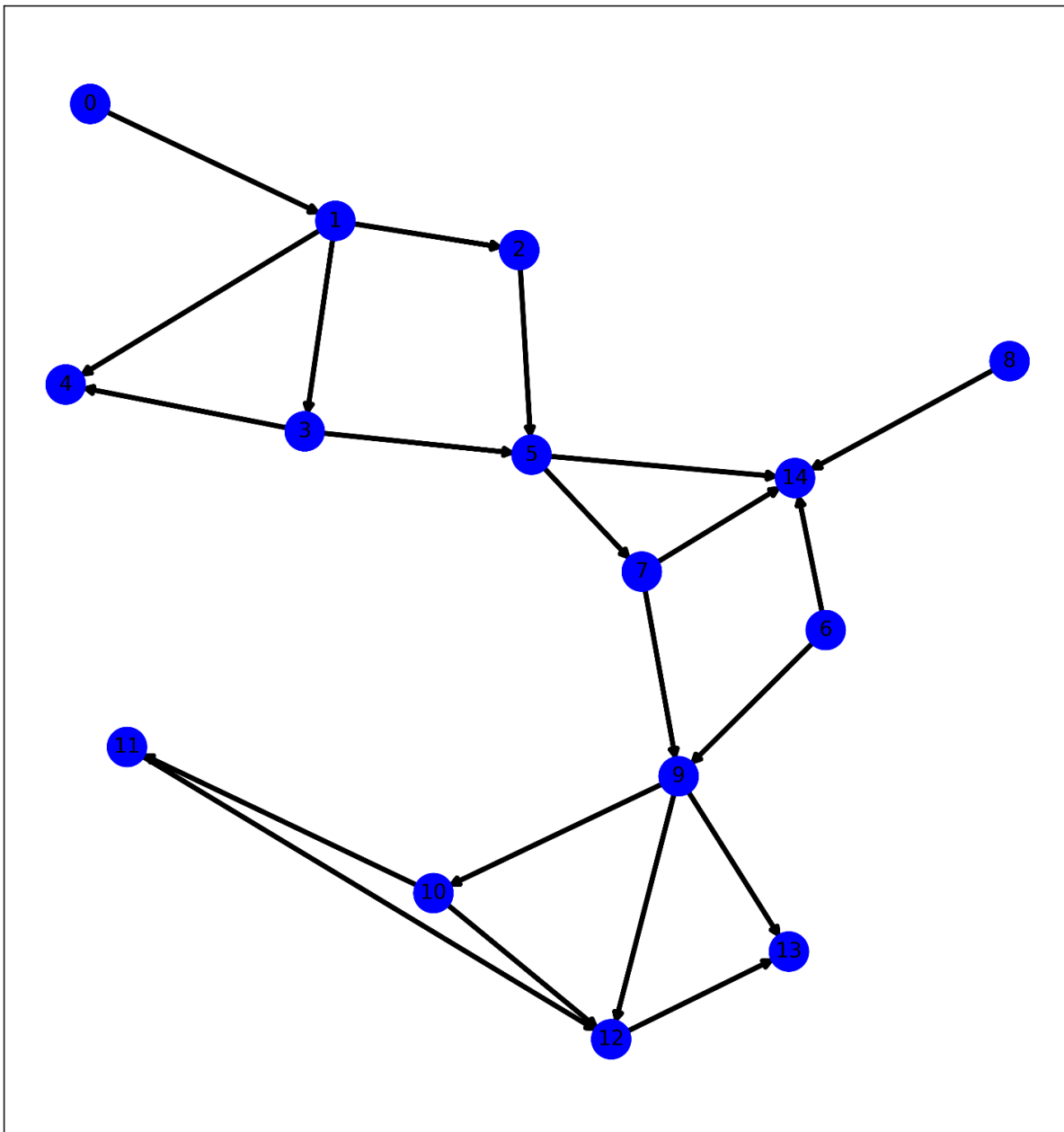
Λογικές ποινές χρησιμοποιήθηκαν για τους περιορισμούς μήκους γραμμής, ομοιότητας γραμμών αλλά και σε μέρος της συχνότητας των λεωφορείων (3.2), (3.3), (3.7), (3.8). Για το μήκος γραμμής χρησιμοποιήθηκε για το μέγιστο αριθμό κόμβων που μπορεί να υπάρχει σε μία διαδρομή S_{max} κι όσον αφορά τις συχνότητες των λεωφορείων χρησιμοποιήθηκε για μέγιστη συχνότητα των τυπικών λεωφορείων ($f_{max,N}$) αλλά και για την ελάχιστη συχνότητα των αρθρωτών λεωφορείων ($f_{min,A}$). **Αριθμητικές ποινές** χρησιμοποιήθηκαν κυρίως στον περιορισμό για την εξυπηρέτηση των επιβατών (3.4). Στους όρους d_1 και d_2 πολλαπλασιάζοντας με την ποινή μετεπιβίβασης αλλά επίσης και στον όρο d_{un} , όταν υπήρχε ανικανοποίητος επιβάτης, με πολλαπλασιασμό με το άπειρο ($+\infty$) προκειμένου να γίνει ανέφτικη η συγκεκριμένη λύση.

4 Εφαρμογή

4.1 Δεδομένα προβλήματος

4.1.1 Περιοχή μελέτης I

Το δίκτυο μελέτης της διπλωματικής εργασίας, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του επανασχεδιασμού είναι το Ελβετικό δίκτυο Mandl. Πρόκειται για ένα δίκτυο που αποτελείται από δεκαπέντε (15) κόμβους και είκοσι (20) συνδέσμους (Mandl's Swiss Road Network – Σχήμα 4.1) και χρησιμοποιείται από αρκετούς ερευνητές.



Σχήμα 4.1 – Mandl's Swiss Road Network

Είναι ένα δίκτυο που μπορεί να δώσει μια καλή αποτύπωση του προβλήματος και μπορούν να εξεταστούν εναλλακτικές λύσεις. Το δίκτυο Mandl έχει αρκετά πλεονεκτήματα όπως το μικρό του μέγεθος. Λόγω του μεγέθους του δικτύου είναι εύκολο να γίνουν εφαρμογές των εναλλακτικών λύσεων. Ακόμη, είναι ένα δίκτυο με αρκετές ομοιότητες με ένα κανονικό, επομένως μπορεί να γίνει πιο εύκολα αναγωγή της βέλτιστης λύσης μ' ένα πραγματικό. Επίσης, τα δεδομένα του δικτύου είναι σταθερά, άρα κι εύκολα στην εύρεσή τους. Τέλος, η χρήση αυτού του δικτύου δίνει την δυνατότητα σύγκρισης των μεθόδων αλλά και των αποτελεσμάτων με άλλους ερευνητές.

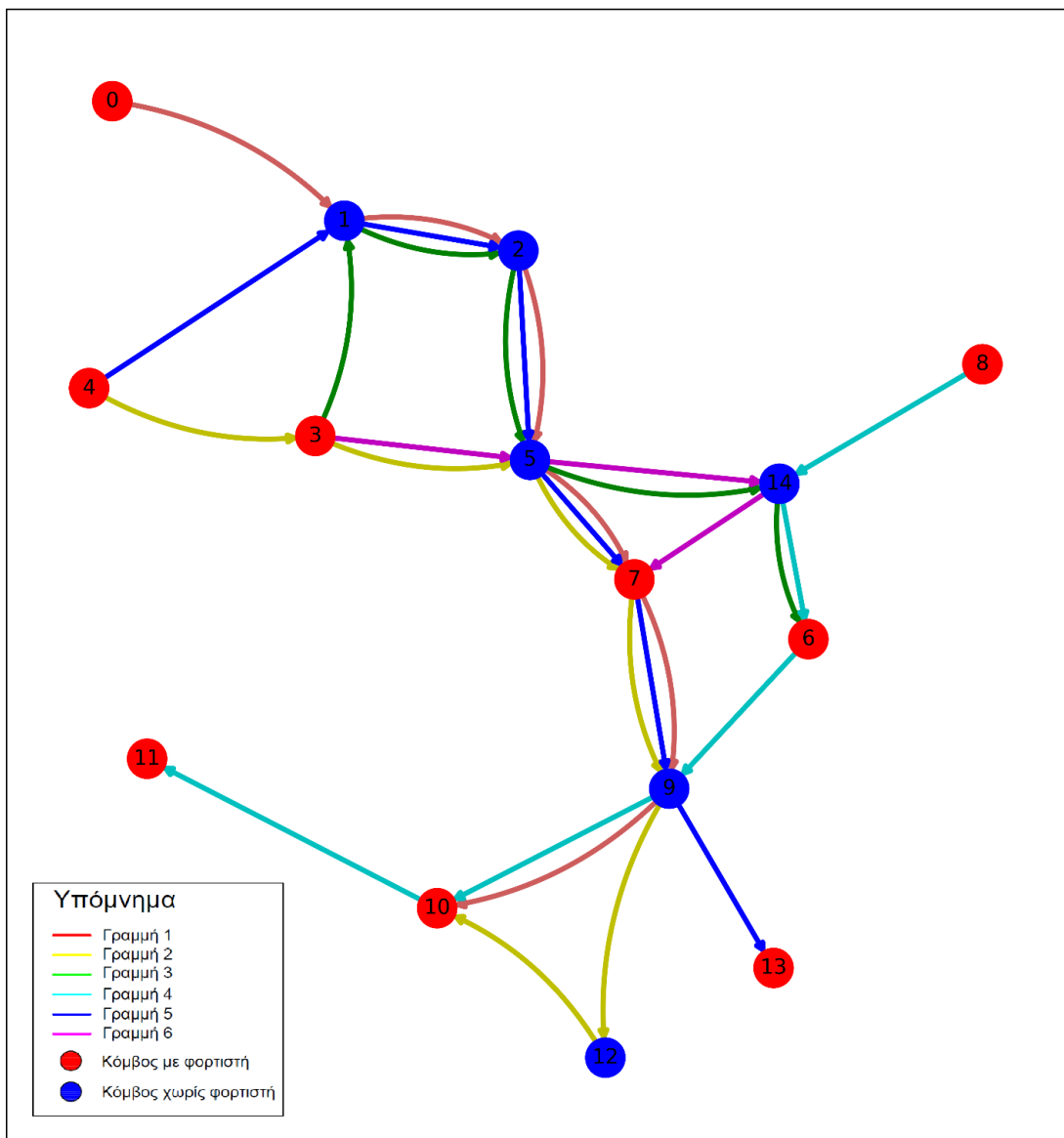
4.1.1.1 Δεδομένα Περιοχής Μελέτης I

Για την περιοχή μελέτης I ως δεδομένα του προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν τρία (3) βασικά πράγματα. Το πρώτο είναι η ζήτηση, δηλαδή ο Πίνακας Προέλευσης – Προορισμού (Πίνακας 4.1), το δεύτερο είναι ο Πίνακας Χρόνου μετακίνησης των επιβατών (Πίνακας 4.1) και το τελευταίο είναι το αρχικό δίκτυο που υπάρχει (Σχήμα 4.2).

Πίνακας 4.1 – Προέλευσης - Προορισμού															
	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

Πίνακας 4.2 – Χρόνοι Μετακίνησης															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	8	0	2	3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	2	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	3	0	0	4	4	0	0	0	0	0	10	0	0	0

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



Σχήμα 4.2 – Αρχικό δίκτυο Mandl

4.1.1.2 *Παραδοχές Περιοχής Μελέτης I*

Λόγω της μορφής του προβλήματος είναι αναγκαίο να αναφερθούν ποιες παράμετροι δεν θα ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό. Αυτό συμβαίνει, διότι κάποιοι παράμετροι όπως είναι η ανθρώπινη συμπεριφορά είναι πολύ δύσκολο να ενταχθούν μέσα σε κάποιο μαθηματικό μοντέλο.

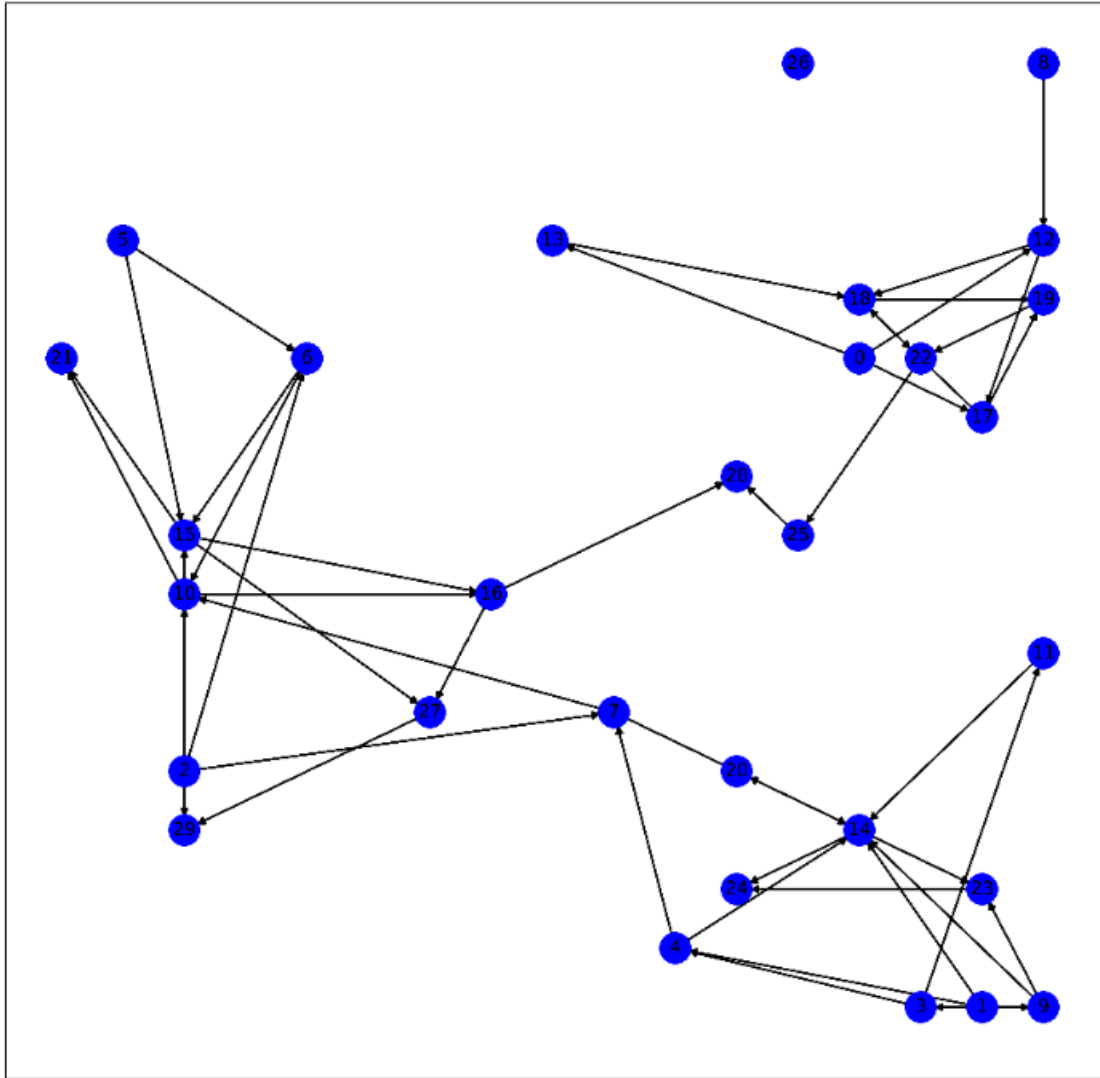
Επομένως, για την περιοχή μελέτης I έχουμε τις εξής παραδοχές:

1. Οι μετακινήσεις που απεικονίζονται στον Πίνακα Προέλευσης – Προορισμού (Πίνακας 4.1) θεωρήθηκαν ότι είναι οι ωριαίες μετακινήσεις του δικτύου και παραμένουν σταθερές κατά την διάρκεια του χρόνου.
2. Ο χρόνος διαδρομής (Πίνακας 4.2) για κάθε σύνδεσμο είναι σταθερός και ανεξάρτητος του φόρτου. Επιπλέον, θεωρείται ότι στον χρόνο διαδρομής συμπεριλαμβάνεται και ο χρόνος στάσης. Μονάδα μέτρησης του χρόνου διαδρομής (Πίνακας 4.2) είναι τα λεπτά (min).
3. Για τα ηλεκτρικά λεωφορεία θεωρήθηκε σαν ταχύτητα κίνησης τα 15 km/h, μια συνήθης τιμή ταχύτητας. (Iliorouloulou and Keraptsoglou, 2019).

Θα ήταν δυνατόν να προστεθούν κι άλλες παραδοχές, ωστόσο για την παρούσα διπλωματική εργασία θεωρείται ότι δεν είναι απαραίτητο. Για περαιτέρω έρευνα, θα μπορούσε να προστεθούν παραδοχές για τις καιρικές συνθήκες, τον τρόπο επιβίβασης – αποβίβασης των επιβατών, η διαμόρφωση των στάσεων κ.α., αφού πρώτα συμπεριλαμβάνονταν στο μαθηματικό μοντέλο.

4.1.2 *Περιοχή μελέτης II*

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εκτός από την βασική περιοχή μελέτης, όπου εκεί έγιναν όλα τα πειράματα, χρησιμοποιήθηκε ένα ακόμη περιβάλλον. Μία τεχνητή περιοχή μελέτης μεγαλύτερη από την αρχική, με τριάντα (30) κόμβους και ενενήντα (90) συνδέσεις (Σχήμα 4.3 - Mumford0).



Σχήμα 4.3 – Mumford0

Πρόκειται για ένα δίκτυο μεγαλύτερο από το αρχικό για να μπορέσει να δώσει μια καλύτερη εικόνα της αποτελεσματικότητας του αλγορίθμου.

4.1.2.1 Δεδομένα Περιοχής μελέτης II

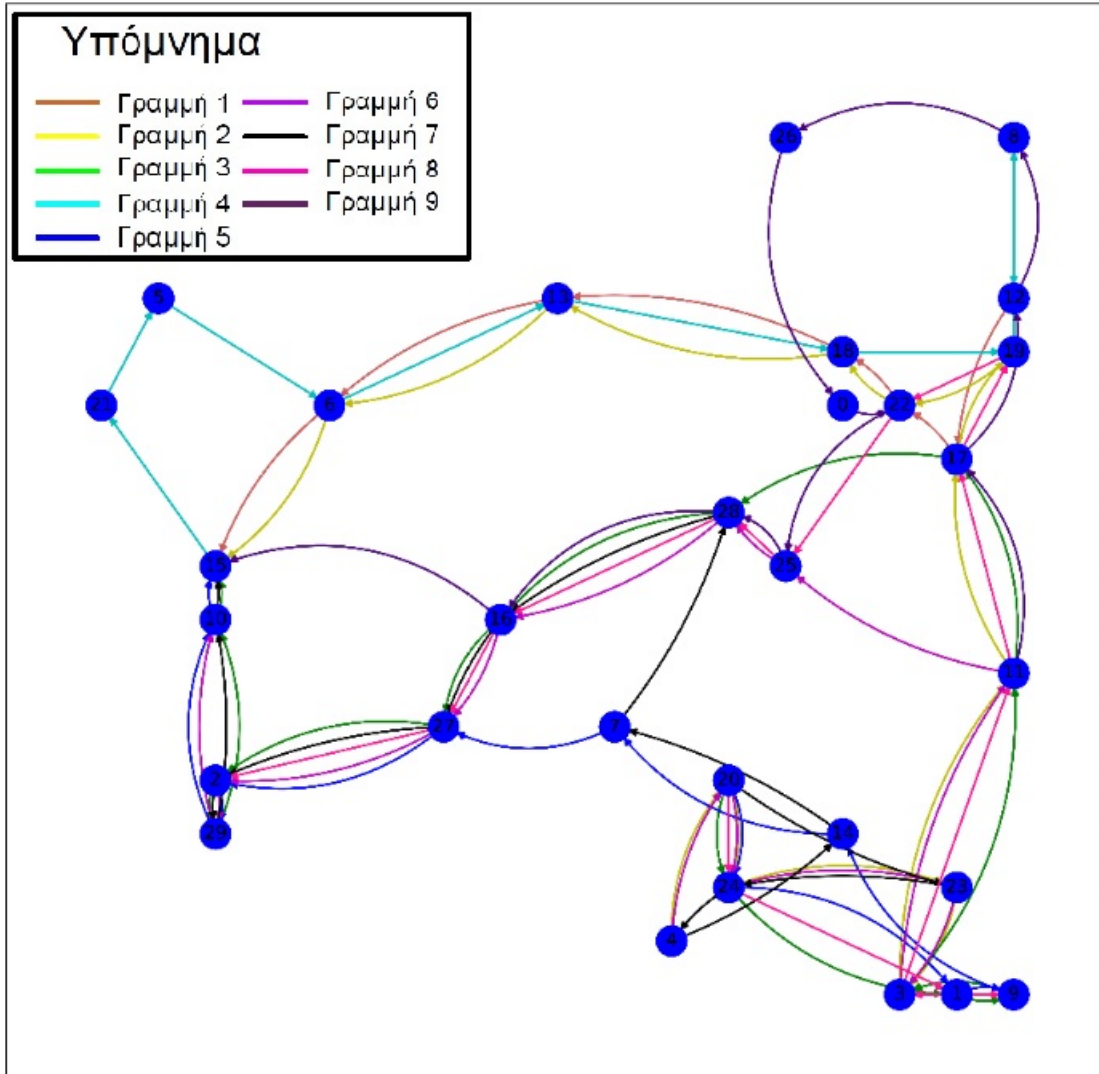
Για την περιοχή μελέτης II ως δεδομένα του προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν τρία (3) βασικά πράγματα. Το πρώτο είναι η ζήτηση, δηλαδή ο Πίνακας Προέλευσης – Προορισμού (Πίνακας 4.3), το δεύτερο είναι ο Πίνακας Χρόνου μετακίνησης των επιβατών (Πίνακας 4.4) και το τελευταίο είναι το αρχικό δίκτυο που υπάρχει (Σχήμα 4.4).

Πίνακας 4.3 – Πίνακας Προέλευσης – Προορισμού

		Πίνακας Μετακινήσεων																												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
0	0	770	5	620	655	695	70	320	210	645	350	730	150	215	120	110	700	465	440	120	685	500	285	415	325	65	195	100	150	195
1	770	0	335	40	725	760	395	395	275	725	300	90	625	315	195	325	80	110	755	765	465	50	190	285	660	15	35	140	520	590
2	5	335	0	520	365	440	240	600	155	550	150	295	505	625	65	745	625	390	350	360	250	410	410	655	640	520	305	650	430	285
3	620	40	520	0	755	705	445	500	470	170	245	380	185	680	160	185	140	185	350	250	740	345	150	725	785	355	90	210	330	480
4	655	725	365	755	0	210	485	570	180	95	240	260	340	410	70	210	645	25	745	585	395	465	190	370	775	440	420	190	395	500
5	695	760	440	705	210	0	545	320	295	795	35	710	735	640	80	210	270	545	110	580	90	525	400	625	575	725	715	270	560	160
6	70	395	240	445	485	545	0	25	600	405	385	725	490	495	690	645	465	150	195	710	25	395	135	785	575	405	380	50	550	35
7	320	395	600	500	570	320	25	0	60	420	80	655	655	580	120	530	415	780	520	645	365	350	665	70	110	140	315	670	645	50
8	210	275	155	470	180	295	600	60	0	320	425	335	530	505	235	350	15	790	135	85	300	160	395	275	765	740	45	595	220	340
9	645	725	550	170	95	795	405	420	320	0	440	755	335	790	245	565	535	435	560	535	145	105	800	140	30	450	710	540	155	300
10	350	300	150	245	240	35	385	80	425	440	0	370	790	130	685	520	305	155	345	390	100	475	185	310	470	205	235	495	215	600
11	730	90	295	380	260	710	725	655	335	755	370	0	790	585	280	470	90	730	705	655	210	480	20	345	255	130	145	340	80	480
12	150	625	505	185	340	735	490	655	530	335	790	790	0	380	560	560	515	30	60	260	425	525	330	660	575	775	430	265	85	490
13	215	315	625	680	410	640	495	580	505	790	130	585	380	0	625	340	75	215	125	225	355	425	370	705	415	755	515	770	195	545
14	120	195	65	160	70	80	690	120	235	245	685	280	560	625	0	235	540	560	55	205	180	535	680	280	625	545	10	485	310	735
15	110	325	745	185	210	210	645	530	350	565	520	470	560	340	235	0	5	370	340	370	620	260	630	380	30	145	580	380	125	275
16	700	80	625	140	645	270	465	415	15	535	305	90	515	75	540	5	0	490	155	595	195	735	220	615	155	230	75	465	550	440
17	465	110	390	185	25	545	150	780	790	435	155	730	30	215	560	370	490	0	345	520	520	545	510	760	170	570	190	100	490	365
18	440	755	350	350	745	110	195	520	135	560	345	705	60	125	55	340	155	345	0	370	530	620	285	530	335	675	670	210	495	470
19	120	765	360	250	585	580	710	645	85	535	390	655	260	225	205	370	595	520	370	0	435	700	215	255	100	755	520	385	515	440
20	685	465	250	740	395	90	25	365	300	145	100	210	425	355	180	620	195	520	530	435	0	520	440	580	420	795	175	85	90	55
21	500	50	410	345	465	525	395	350	160	105	475	480	525	425	535	260	735	545	620	700	520	0	325	360	295	615	505	620	750	780
22	285	190	410	150	190	400	135	665	395	800	185	20	330	370	680	630	220	510	285	215	440	325	0	155	115	560	80	425	425	690
23	415	285	655	725	370	625	785	70	275	140	310	345	660	705	280	380	615	760	530	255	580	360	155	0	390	315	540	595	420	280
24	325	660	640	785	775	575	575	110	765	30	470	255	575	415	625	30	155	170	335	100	420	295	115	390	0	120	470	210	40	605
25	65	15	520	355	440	725	405	140	740	450	205	130	775	755	545	145	230	570	675	255	495	615	560	315	120	0	195	355	555	290
26	195	35	305	90	420	715	380	315	45	710	235	145	430	515	10	580	75	190	670	520	175	505	80	540	470	195	0	590	320	550
27	100	140	650	210	190	270	50	670	595	540	495	340	265	770	485	380	465	100	210	385	85	620	425	595	210	355	590	0	565	355
28	150	520	430	330	395	560	550	645	220	155	215	80	85	195	310	125	550	490	495	515	90	750	425	420	40	555	320	565	0	20
29	195	590	285	480	500	160	35	50	340	300	660	480	490	545	735	275	440	365	470	440	55	780	690	280	605	290	550	355	20	0

Πίνακας 4.4 – Πίνακας Χρόνων Μετακίνησης

		Πίνακας Χρόνων																												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	6	0	0	0	4	1	4	0	0	2	0	0	5	5	0	5	0
1	0	0	0	1	6	0	0	0	0	2	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	8	8	0	0	4	0	0	0	0	5	7	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	5	0	2
3	0	1	0	0	6	0	0	0	0	2	0	7	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5	0	0	0	0	0
4	0	6	0	6	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	4	0	0	6	2	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	8	0	0	5	0	0	0	0	5	0	0	5	0	5	6	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	8	0	5	0	0	0	0	0	8	0	0	0	5	0	4	0	0	0	3	0	0	0	5	5	0	4	5	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0
9	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
10	0	0	4	0	0	0	5	8	0	0	0	0	0	0	0	2	6	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	5	0	5
11	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0
12	4	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	2	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0
13	6	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	5	0	5	5	0	0	5	0	5	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	3	3	0	0	0	0	0
15	0	0	5	0	0	6	5	0	0	0	2	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	6	0	6
16	0	0	7	0	0	0	6	4	0	0	6	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5	0
17	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	4	0	0	0	0	0	4	3	0	0	2	0	0	0	0	0	5	0
18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	6	0	0	0	4	0	4	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
19	4	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	2	0	0	0	0	3	4	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	4	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	3	0	0	0	0
21	0	0	8	0	0	3	5	0	0	0	5	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	2	2	3	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0
23	0	3	0	3	6	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	5	0	0	0	5	0	0	0	0	0
24	0	5	0	5	2	0	0	5	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	5	0	0	0	0	0	0
25	5	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	2	0
26	5	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	5	0	0	0	0	4	0	0	5	0	0	0	0	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
28	5	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
29	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0



Σχήμα 4.4 – Αρχικό Δίκτυο Mumford0

4.1.2.2 Παραδοχές Περιοχής Μελέτης II

Λόγω της μορφής του προβλήματος είναι αναγκαίο να αναφερθούν ποιες παράμετροι δεν θα ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό. Αυτό συμβαίνει, διότι κάποιες παράμετροι όπως είναι η ανθρώπινη συμπεριφορά είναι πολύ δύσκολο να ενταχθούν μέσα σε κάποιο μαθηματικό μοντέλο.

Επομένως, για την περιοχή μελέτης II έχουμε τις εξής παραδοχές:

1. Οι μετακινήσεις που απεικονίζονται στον Πίνακα Προέλευσης – Προορισμού (Πίνακας 4.3) θεωρούνται ότι είναι οι συνολικές μετακινήσεις του δικτύου και παραμένουν σταθερές κατά την διάρκεια του χρόνου.

2. Θεωρήθηκε ότι οι Αστικές Συγκοινωνίες λειτουργούν 19 ώρες (h) την ημέρα, π.χ. 5:00 – 24:00
3. Ο χρόνος διαδρομής (Πίνακας 4.4) για κάθε σύνδεσμο είναι σταθερός και ανεξάρτητος του φόρτου. Επιπλέον, θεωρείται ότι στον χρόνο διαδρομής συμπεριλαμβάνεται και ο χρόνος στάσης. Μονάδα μέτρησης του χρόνου διαδρομής (Πίνακας 4.4) είναι τα λεπτά (min).
4. Για τα ηλεκτρικά λεωφορεία θεωρήθηκε σαν ταχύτητα κίνησης τα 15 km/h, μια συνήθης τιμή ταχύτητας (Iliorouloulou and Keraptsoglou, 2019).

Θα ήταν δυνατόν να προστεθούν κι άλλες παραδοχές, ωστόσο για την παρούσα διπλωματική εργασία θεωρείται ότι δεν είναι απαραίτητο. Για περαιτέρω έρευνα, θα μπορούσε να προστεθούν παραδοχές για τις καιρικές συνθήκες, τον τρόπο επιβίβασης – αποβίβασης των επιβατών, η διαμόρφωση των στάσεων κ.α., αφού πρώτα συμπεριλαμβάνονταν στο μαθηματικό μοντέλο.

4.1.3 Κόστος υλοποίησης γραμμών

Εκτός από τον επανασχεδιασμό του δικτύου υπάρχει άλλο ένα βασικό στοιχείο που πρέπει να υπολογιστεί στην εργασία. Αυτό είναι το κόστος για την κατασκευή των γραμμών του καινούργιου δικτύου είτε αυτές αποτελούνται από ηλεκτρικά λεωφορεία είτε όχι. Για τον υπολογισμό του κόστους λήφθηκαν υπόψη οι παρακάτω παράμετροι με τις τιμές τους:

Πίνακας 4.5 – Κόστος Κατασκευής Γραμμών Αστικών Λεωφορείων	
Παράμετρος	Τιμή
Κόστος ηλεκτρικού λεωφορείου χωρίς μπαταρία (€)	350.000
Κόστος πετρελαιοκίνητου λεωφορείου (€)	225.000
Κόστος μπαταρίας (€/kWh)	800
Κόστος φορτιστών (€)	60.000
Κόστος χρόνου ικανοποιημένων χρηστών (€)	8
Κόστος χρόνου ανικανοποίητων χρηστών (€)	80

Για το κόστος χρόνου των ανικανοποίητων χρηστών θεωρήθηκε μια τιμή πολύ μεγαλύτερη από το κόστος χρόνου των ικανοποιημένων. Έτσι, το κόστος των ανικανοποίητων είναι δέκα (10) φορές μεγαλύτερο.

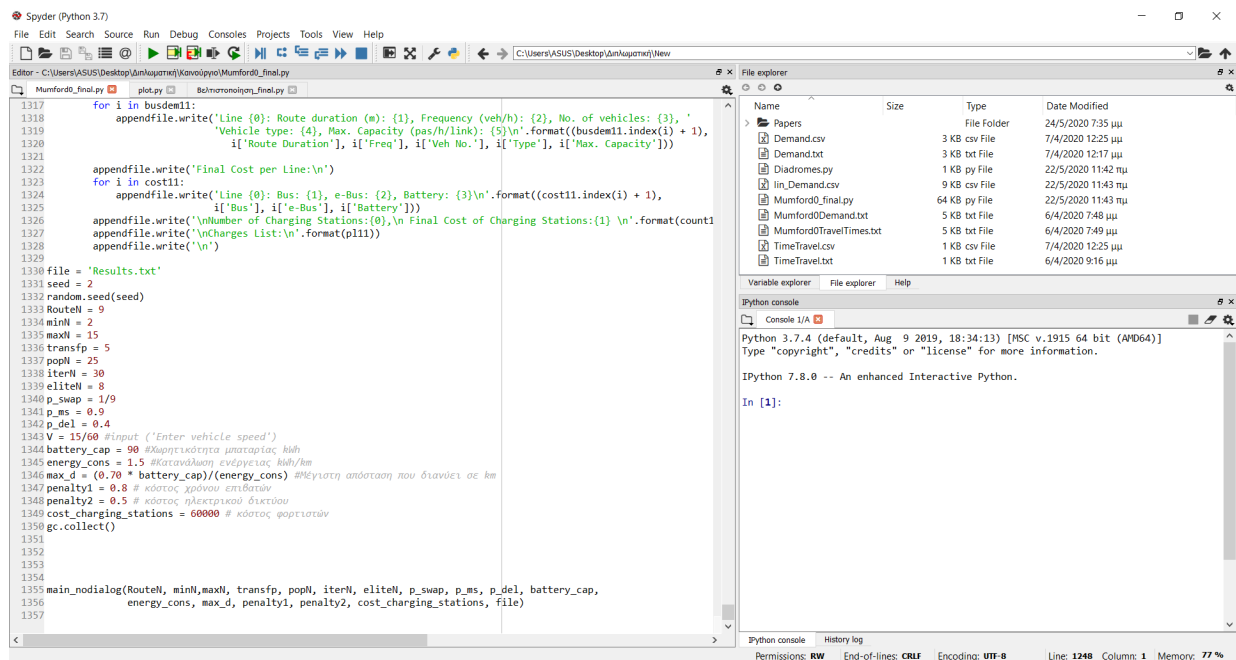
4.2 Περιβάλλον επίλυσης

Ο κώδικας που αναπτύχθηκε για την επίλυση του προβλήματος αποτελείται σε έναν βαθμό από αλγόριθμο προηγούμενης διπλωματικής εργασίας, ο οποίος επεκτάθηκε για τις απαιτήσεις της υπάρχουσας εργασίας.

Ο αλγόριθμος αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Python 3.7.4, μέσα από το προγραμματιστικό περιβάλλον Anaconda Navigator 3.0 – Spyder 3.7.

Η Python είναι μια γλώσσα προγραμματισμού απλή κι εύκολη στην εκμάθηση, δυναμική, αποδοτική και επεκτάσιμη. Είναι μια γλώσσα προγραμματισμού για όλους των ειδών τους χρήστες, μέσα στην οποία γίνεται να αναπτυχθούν ολόκληρες εφαρμογές. Περιέχει έτοιμες βιβλιοθήκες, με την δυνατότητα επέκτασής τους.

Πρόκειται για μια αντικειμενοστραφής γλώσσα προγραμματισμού με ανοιχτό κώδικα και μπορεί να διαχειριστεί δομές δεδομένων υψηλού επιπέδου. Βέβαια, εκτός από τα θετικά υπάρχουν και τα αρνητικά. Όπως, ότι σε κάποιες περιπτώσεις ο χρόνος εκτέλεσης του προγράμματος μπορεί να είναι αρκετά μεγάλος. Αυτό συμβαίνει γιατί η Python δεν μετατρέπει το πρόγραμμα σε δυαδικό σύστημα αλλά εκτελείται απευθείας από τον επεξεργαστή του υπολογιστή.



Εικόνα 4.1 – Ένα τυπικό παράθυρο Spyder 3.7

4.3 Γενετικοί αλγόριθμοι

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic Algorithms – GAs) αναζητούν την βέλτιστη λύση σ' ένα μαθηματικό πρόβλημα. Ανήκουν στον κλάδο της επιστήμης των υπολογιστών αλλά ο τρόπος λειτουργίας τους είναι εμπνευσμένος από την βιολογία. Οι αλγόριθμοι αυτοί έχουν σαν βασική αρχή την στρατηγική εξέλιξης μέσω της μετάλλαξης, της φυσικής επιλογής και της διασταύρωσης.

Οι πρώτοι γενετικοί αλγόριθμοι (GAs) έκαναν την εμφάνισή τους στις αρχές του 1950, από Βιολόγους επιστήμονες στην προσπάθειά τους να χρησιμοποιήσουν τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές για πρώτη φορά. Ωστόσο, η αρχή για την συστηματική ανάπτυξή τους έγινε το 1970 από τον John Holland (Holland 1975) και τους συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο του Michigan.

Η ορολογία που χρησιμοποιείται από τους γενετικούς αλγορίθμους (GAs) είναι δανεισμένη από τις επιστήμες της Γενετικής και της Βιολογίας. Έτσι, γίνεται αναφορά σε άτομα (individuals) ή γονότυπους (genotypes) ενός πληθυσμού, που αποτελούνται από χρωμοσώματα (chromosomes). Τα μέρη ενός χρωμοσώματος (chromosomes) είναι τα γονίδια (genes). Τα γονίδια είναι τοποθετημένα σε συγκεκριμένες θέσεις (loci) μέσα σε κάθε χρωμόσωμα. Το κάθε γονίδιο μπορεί να βρίσκεται σε διαφορετικές καταστάσεις, κάθε μια από τις οποίες ονομάζεται αλληλόμορφο (allele). (Καρλαύτης και Λαγαρός, 2010)

Με λίγα λόγια, οι γενετικοί αλγόριθμοι (GAs) για την λύση ενός τυπικού προβλήματος αποτελούνται από πέντε (5) βασικά τμήματα:

1. Αναπαράσταση των πιθανών λύσεων του προβλήματος
2. Δημιουργία αρχικού πληθυσμού πιθανών λύσεων
3. Την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, με βάση την οποία αξιολογούνται οι λύσεις
4. Γενετικούς τελεστές για την δημιουργία νέων λύσεων
5. Τιμές για τις διάφορες παραμέτρους που χρησιμοποιεί ο γενετικός αλγόριθμος (όπως είναι το μέγεθος του πληθυσμού)

4.3.1 Διαδικασία εκτέλεσης Γενετικού Αλγορίθμου

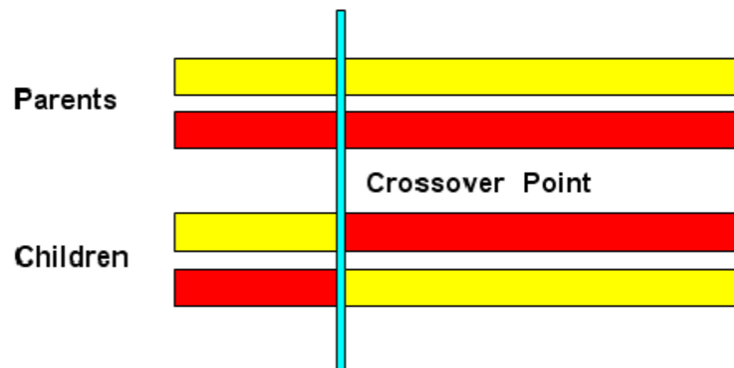
Τα βασικά βήματα ενός γενετικού αλγορίθμου (GAs) που ακολουθούνται κατά την διαδικασία εφαρμογής του είναι:

1. Δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού (Αρχικοποίηση – Initialization)
2. Αξιολόγηση κάθε λύσης
3. Επιλογή νέου πληθυσμού (Επιλογή – Selection)
4. Επιλογή γενετικών τελεστών διασταύρωσης (Crossover) και μετάλλαξης (Mutation)
5. Επιστροφή στο βήμα (2)
6. Τερματισμός του γενετικού αλγορίθμου. (Γεωργόπουλος, Λυκοθανάσης, 1999)

Αναλυτικότερα:

1. **Αρχικοποίηση (Initialization):** Στο πρώτο βήμα δημιουργείται ένας αρχικός πληθυσμός λύσεων, ο οποίος παραμένει σταθερός καθ' όλη την διάρκεια του γενετικού αλγορίθμου (GAs)

2. **Αξιολόγηση κάθε λύσης:** Υπολογισμός της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης. Ανάλογα με το αν είναι πρόβλημα ελαχιστοποίησης ή μεγιστοποίησης λαμβάνεται υπόψη η ελάχιστη ή η μέγιστη τιμή αντίστοιχα.
3. **Επιλογή (Selection):** Η επιλογή νέου πληθυσμού γίνεται με την μέθοδο της «ρουλέτας με σχισμές» (slotted roulette wheel). Κάθε άτομο τοποθετείται στην ρουλέτα και καταλαμβάνει χώρο ανάλογα με την απόδοσή του, έτσι ανάλογη να είναι και η επιλογή του.
4. **Τελεστές διασταύρωσης (Crossover) και μετάλλαξης (Mutation):** Κάθε άτομο του πληθυσμού έχει πιθανότητα p_c να επιλεγεί. Για κάθε άτομο επιλέγεται τυχαία ένας πραγματικός αριθμός r από το κλειστό σύνολο $[0, 1]$. Αν ο τυχαίος αριθμός $r < p_c$, τότε το άτομο επιλέγεται για διασταύρωση. Ο αναμενόμενος αριθμός των ατόμων που επιλέχθηκαν για διασταύρωση είναι $p_c * popN$, όπου $popN$ είναι το μέγεθος του πληθυσμού. Από αυτά τα άτομα δημιουργούνται ζευγάρια και για κάθε ζευγάρι επιλέγεται τυχαία ένας ακέραιος αριθμός pos στο κλειστό διάστημα $[0, m-1]$, όπου m είναι το μήκος του χρωμοσώματος. Ο αριθμός αυτός, pos , προσδιορίζει το σημείο της διασταύρωσης. Έτσι, τα επιλεγμένα ζευγάρια «γονείς» διασταυρώνονται και την θέση τους παίρνουν οι «απόγονοι».



Εικόνα 4.2 – Διασταύρωση

Πηγή: <https://figshare.com/>(*)

Στην συνέχεια, από τα νέα άτομα, «απόγονοι», που προέκυψαν από την διαδικασία της διασταύρωσης επιλέγονται κάποια γονίδια τυχαία και μεταβάλλονται με την διαδικασία της μετάλλαξης (mutation). Η διαδικασία της μετάλλαξης στον γενετικό αλγόριθμο αντιμετωπίζει τον πληθυσμό σαν δυαδικά ψηφία και με τον τελεστή της μετάλλαξης απλώς τα αντιστρέφει. Κάθε δυαδικό ψηφίο έχει την ίδια πιθανότητα να επιλεγεί με οποιοδήποτε άλλο, p_m . Για κάθε χρωμόσωμα αλλά και για κάθε γονίδιο επιλέγεται ένας τυχαίος πραγματικός αριθμός r από το κλειστό σύνολο $[0, 1]$. Αν ο τυχαίος αριθμός $r < p_m$, τότε γίνεται μετάλλαξη του γονιδίου. Ο αναμενόμενος αριθμός των αντιστραμμένων ψηφίων είναι $p_m * m * popN$.

Before mutation

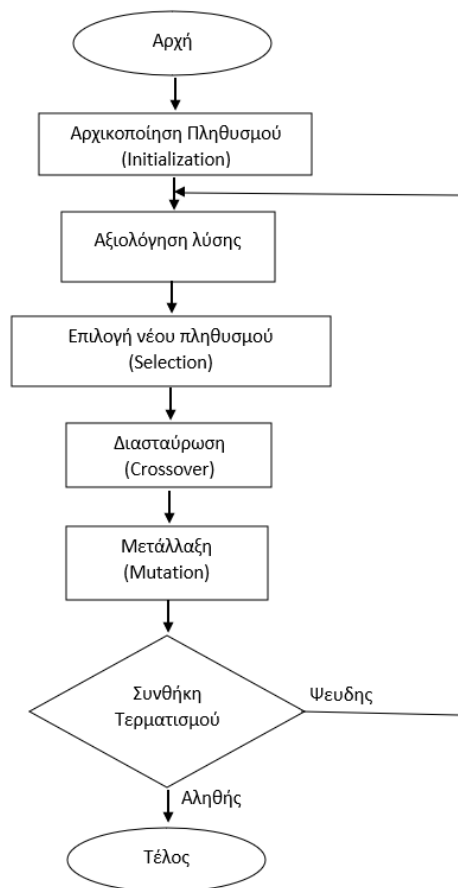
8	6	2	5	3	4	9	1	7	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

After mutation

8	6	9	5	3	4	2	1	7	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Εικόνα 4.3 – Μετάλλαξη
 Πηγή: <https://figshare.com/> (**)

5. **Επιστροφή στο βήμα (2):** Αξιολόγηση των νέων ατόμων μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης.
6. **Τερματισμός του γενετικού αλγορίθμου:** Για να ολοκληρωθεί ο γενετικός αλγόριθμος πρέπει η συνθήκη τερματισμού να γίνει αληθής, αλλιώς ο αλγόριθμος θα συνεχίσει να προσπαθεί να βρει την βέλτιστη λύση. Για την συγκεκριμένη εργασία, ως συνθήκη τερματισμού επιλέχθηκε ο αριθμός των επαναλήψεων.



Εικόνα 4.4 – Διάγραμμα ροής γενετικού αλγορίθμου

4.3.2 Πλεονεκτήματα Γενετικών Αλγορίθμων

Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι αρκετά διαδεδομένοι για την επίλυση προβλημάτων κι αυτό είναι επειδή έχουν αρκετά πλεονεκτήματα. Μερικά από αυτά είναι: (Γεωργόπουλος και Λυκοθανάσης, 1999)

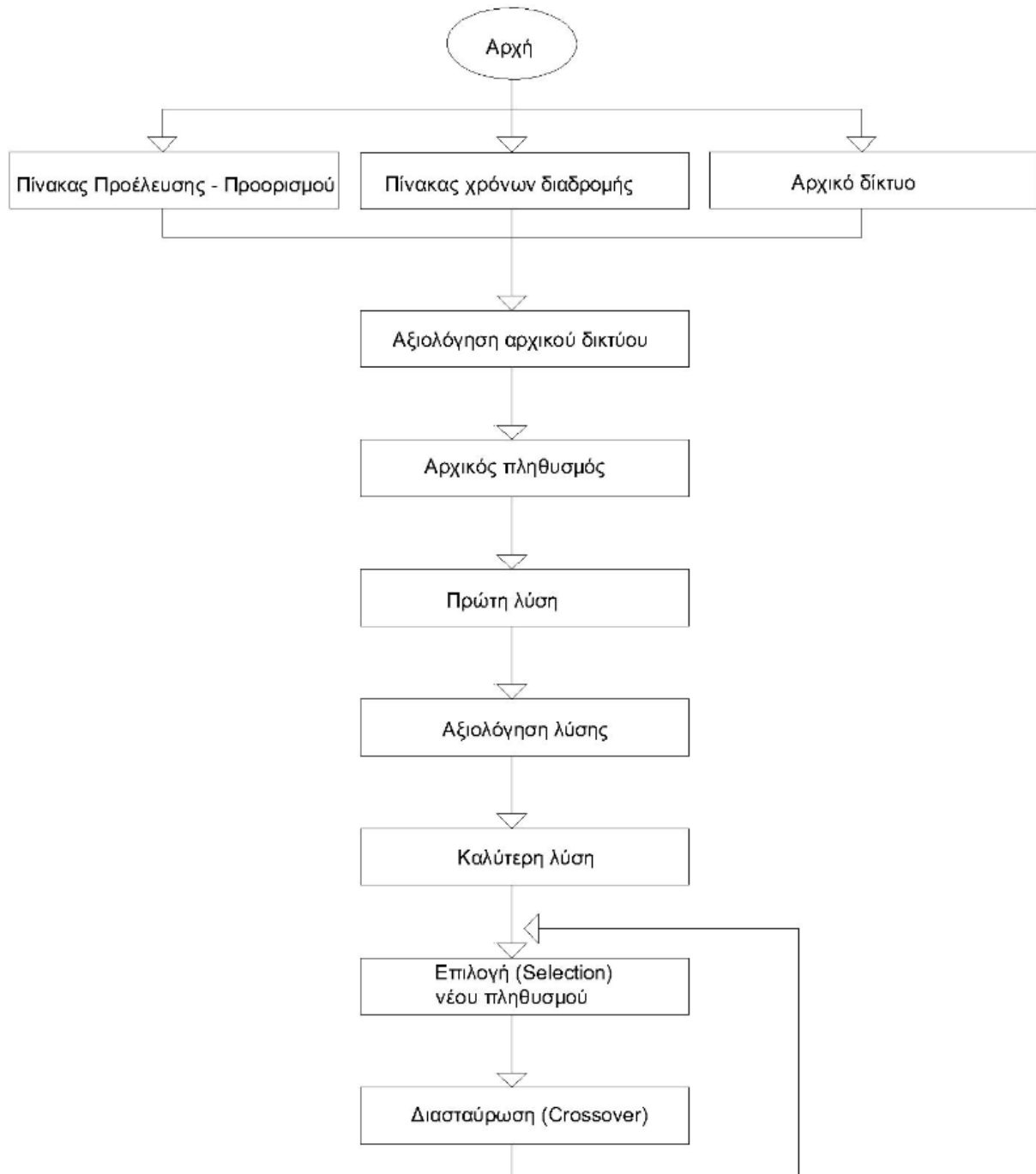
1. Οι γενετικοί αλγόριθμοι θεωρούνται σημαντικοί λόγω της μεγάλης αποδοτικότητάς τους. Έχουν την ικανότητα να επιλύσουν δύσκολα προβλήματα και με μεγάλη αξιοπιστία. Έχουν αποδείξει ότι είναι ικανοί να επιλύσουν προβλήματα που με άλλες μεθόδους είναι σχεδόν αδύνατο να προσδιοριστούν λόγω της πολυπλοκότητάς τους ή της μεγάλης διακύμανσης των συναρτήσεων.
2. Μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν από ήδη υπάρχοντα συστήματα χωρίς να χρειάζεται επανασχεδιασμός του αλγορίθμου. Αυτό συμβαίνει γιατί χρησιμοποιούν στοιχεία της συνάρτησης που θέλουν να βελτιστοποιήσουν, χωρίς να έχει σημασία ο ρόλος τους μέσα στον αλγόριθμο.
3. Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι εύκολα εξελίξιμοι και επεκτάσιμοι, καθώς δεν αντιστέκονται σε αλλαγές, επεκτάσεις και μεταλλάξεις ανάλογα με την κρίση του προγραμματιστή.
4. Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν μεγάλη ευελιξία, αφού μπορούν να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους που έχουν περισσότερη εξειδίκευση σε κάποια προβλήματα.
5. Το πεδίο εφαρμογής του είναι ευρύ, αφού το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η ανεξαρτησία στην επιλογή των κριτηρίων που καθορίζουν την επιλογή μέσα στο τεχνικό περιβάλλον. Έτσι, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν σε πολλούς τομείς όπως είναι η οικονομία, η σχεδίαση μηχανών κ.α.
6. Ένας ακόμη λόγος που οι γενετικοί αλγόριθμοι υπερτερούν σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους είναι ότι δεν απαιτούν περιορισμούς στις συναρτήσεις. Αυτοί οι περιορισμοί έκαναν τις παλαιότερες μεθόδους ακατάλληλες για πολλά προβλήματα. Στους γενετικούς αλγόριθμους αυτό το πρόβλημα έχει ξεπεραστεί και τους κάνει κατάλληλους για μεγάλο φάσμα προβλημάτων.
7. Ένα ακόμη θετικό είναι ότι οι γενετικοί αλγόριθμοι δεν εξετάζουν τις πληροφορίες που επεξεργάζονται. Η μόνη πληροφορία που εξετάζουν είναι η αντικειμενική συνάρτηση, αυτό σημαίνει ότι ανεξάρτητα από το είδος του προβλήματος θα υπάρχει κάποιο αποτέλεσμα. Βέβαια, υπάρχουν κι άλυτα προβλήματα στους γενετικούς αλγόριθμους, αλλά αυτό έχει να κάνει με την φύση του χώρου κι όχι με τις πληροφορίες.
8. Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν από την φύση τους το στοιχείο του παραλληλισμού. Επεξεργάζονται πολύ μεγάλο όγκο πληροφοριών, αφού κάθε άτομο θεωρείται αντιπρόσωπος πολλών άλλων, με αναλογία $1/10^3$. Έτσι, μπορούν αποδοτικά να ψάξουν μεγάλους χώρους σε μικρούς χρόνους.

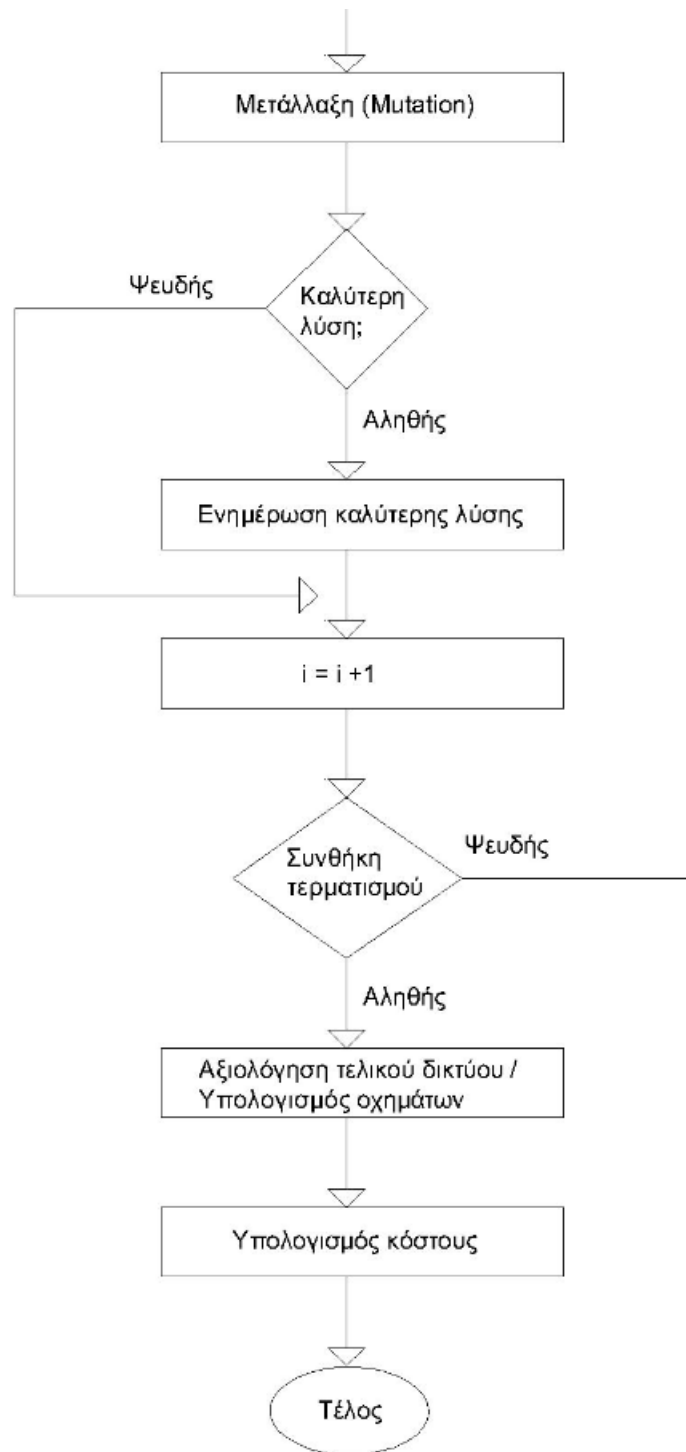
9. Μπορούν να κάνουν ταυτόχρονα εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και εκμετάλλευσης της επεξεργασμένης πληροφορίας. Πρόκειται για δύο χαρακτηριστικά που συνήθως, είναι ανταγωνιστικά μεταξύ τους. Με το τυχαίο ψάξιμο γίνεται καλή εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης, αλλά δεν γίνεται εκμετάλλευση της επεξεργασμένης πληροφορίας. Αντίθετα, με το hill – climbing γίνεται εκμετάλλευση της επεξεργασμένης πληροφορίας, αλλά δεν γίνεται καλή εξερεύνηση του χώρου. Οι γενετικοί αλγόριθμοι κατάφεραν να επιτύχουν τον βέλτιστο συνδυασμό της εξερεύνησης και της εκμετάλλευσης κάτι που τους κάνει πολύ αποδοτικούς και ελκυστικούς.
10. Τέλος, οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να δεχθούν παράλληλη υλοποίηση. Εκμεταλλεύονται τα πλεονεκτήματα των παράλληλων μηχανών, αφού από την φύση τους έχουν το στοιχείο του παραλληλισμού. Είναι ένα χαρακτηριστικό που σπάνια κάποιος μπορεί να το συναντήσει σε ανταγωνιστικές μεθόδους.

4.4 Παρουσίαση των βημάτων επίλυσης

4.4.1 Εισαγωγή

Στην εικόνα 4.5 γίνεται παρουσία του διαγράμματος ροής του προγράμματος που αναπτύχθηκε για την επίλυση του προβλήματος.





Εικόνα 4.5 – Διάγραμμα ροής προγράμματος

4.4.2 Αναλυτική παρουσίαση βημάτων

Το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε για την επίλυση του προβλήματος αποτελείται από έξι (6) βήματα, τα οποία θα αναλυθούν στην συνέχεια.

4.4.2.1 Εισαγωγή δεδομένων

Αρχικά, το πρώτο που πρέπει να γίνει είναι η εισαγωγή των δεδομένων του προβλήματος στον αλγόριθμο.

Το πρώτο που εισάγεται είναι ο Πίνακας Προέλευσης – Προορισμού με τις μετακινήσεις του συνόλου των επιβατών. Ο πίνακας εισάγεται με την μορφή csv – comma separated value και πρόκειται για ένα τετραγωνικό διαγώνιο πίνακα μορφή $N \times N$, όπου N είναι ο αριθμός των κόμβων του δικτύου. Η υποσυνάρτηση, στο συγκεκριμένο σημείο, διαβάζει το csv αρχείο, δημιουργεί ένα ίδιο γραμμικό, που αποτελείται από τρεις (3) στήλες, και τελικά τον ταξινομεί. Η πρώτη στήλη είναι ο κόμβος προέλευσης, η δεύτερη στήλη είναι ο κόμβος προορισμού και η τρίτη στήλη είναι ο αριθμός των επιβατών που μετακινήθηκαν από τον έναν κόμβο στον άλλον. Παράλληλα, το πρόγραμμα αποθηκεύει τον πίνακα αυτόν, στην μνήμη του προκειμένου να τον χρησιμοποιήσει μελλοντικά.

Έπειτα, στο πρόγραμμα εισάγεται ο Πίνακας Χρόνων Μετακινήσεις πάλι υπό την μορφή αρχείου csv – comma separated value. Είναι, επίσης, ένας πίνακας της μορφής $N \times N$, όπου N είναι ο αριθμός των κόμβων του δικτύου. Στον πίνακα τον χρόνων υπάρχει μια ιδιαιτερότητα, οι γειτονικοί κόμβοι λαμβάνουν ως τιμή τον μέσο χρόνο μετακίνησης (σε λεπτά), ενώ οι κόμβοι που δεν έχουν καμία σύνδεση μεταξύ τους λαμβάνουν την τιμή μηδέν (0). Με αυτόν τον τρόπο ο αλγόριθμος είναι ικανός να αναγνωρίσει ποιοι κόμβοι είναι γειτονικοί μεταξύ τους και ποιοι όχι. Τα δεδομένα αυτά αποθηκεύονται στο πρόγραμμα με την μορφή γράφου (graph).

Η γλώσσα προγραμματισμού Python δίνει την δυνατότητα να δημιουργηθεί μια δομή δεδομένων λεξικού (dictionary), η οποία είναι ένα «είδος» πίνακα στον οποίο κάθε στοιχείο έχει κι ένα «κλειδί» (label) – σε αντίθεση με έναν κανονικό πίνακα (array) – κι έτσι η αναζήτηση έγινε με «κλειδί» τον αριθμό της στήλης. Ο γράφος είναι ένα λεξικό G , ο οποίος έχει ως «κλειδιά» όλους τους κόμβους προέλευσης N_i , οι τιμές των οποίων είναι ένα άλλο λεξικό που περιλαμβάνει ως «κλειδιά» όλους τους κόμβους προορισμού N_j από κάθε αντίστοιχο «κλειδί» N_i , εντός του οποίου περιλαμβάνεται ο χρόνος t_{ij} του αντίστοιχου ζεύγους.

G = γράφος (graph)

N = κόμβος (node)

i = προέλευση (origin)

j = προορισμός (destination)

t = χρόνος μετάβασης (time travel)

Το τελευταίο στοιχείο εισαγωγής του προγράμματος είναι το αρχικό δίκτυο, το οποίο σχεδιάστηκε και χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

4.4.2.2 Αξιολόγηση αρχικού δικτύου

Το επόμενο βήμα είναι η αξιολόγηση του αρχικού δικτύου (evaluation), η οποία γίνεται υπολογίζοντας τα ποσοστά μετακινήσεων των επιβατών στις τέσσερις (4) κατηγορίες που διακρίθηκαν καθώς και ο μέσος χρόνος μετακίνησης των επιβατών.

Οι τέσσερις (4) κατηγορίες που διακρίνονται οι επιβάτες είναι:

1. d_0 : το ποσοστό των επιβατών που μεταβιβάζονται στον προορισμό τους χωρίς καμία μετεπιβίβαση
2. d_1 : το ποσοστό των επιβατών που μεταβιβάζονται στον προορισμό τους με μία (1) μετεπιβίβαση
3. d_2 : το ποσοστό των επιβατών που μεταβιβάζονται στον προορισμό τους με δύο (2) μετεπιβιβάσεις
4. d_{un} : το ποσοστό των επιβατών που μένουν ανικανοποίητοι από το υπάρχων δίκτυο

Για κάθε ζευγάρι προέλευσης – προορισμού του δικτύου υπολογίζονται όλες οι πιθανές διαδρομές που μπορούν να ακολουθήσουν οι επιβάτες, έτσι σε κάθε διαδρομή προστίθεται ο χρόνος μετακίνησης καθώς επίσης και η ποινή μετεπιβίβασης όπου αυτή είναι απαραίτητη. Διατηρούνται μόνο εκείνες οι διαδρομές με τον ελάχιστο χρόνο, γιατί γίνεται η θεώρηση πως ο επιβάτης γνωρίζει το δίκτυο, επομένως διαλέγει αρχικά τις διαδρομές με τον λιγότερο χρόνο και κατά δεύτερον εκείνες με τις λιγότερες μετεπιβιβάσεις. Κρατώντας ως εναλλακτικές λύσεις εκείνες με τον ελάχιστο χρόνο και τις ελάχιστες μετεπιβιβάσεις, η ζήτηση του κάθε υπάρχοντος ζεύγους προέλευσης – προορισμού μοιράζεται σε αυτές.

Έτσι, υπολογίζεται το σύνολο των επιβατών που εξυπηρετούνται απευθείας (d_0) από το δίκτυο, εκείνοι που χρειάζονται μία (1) μετεπιβίβαση (d_1), εκείνοι που χρειάζονται δύο (2) μετεπιβιβάσεις (d_2) και εκείνοι που μένουν ανικανοποίητοι από το υπάρχων δίκτυο (d_{un}), τα οποία διαιρούνται με την συνολική ζήτηση για τα προκύψουν τα ποσοστά της κάθε κατηγορίας. Επίσης αθροίζονται και οι χρόνοι διαδρομής, οι οποίοι στην συνέχεια διαιρούνται με τον αριθμό των μετακινούμενων επιβατών για να προκύψει ο μέσος χρόνος διαδρομής (ΑΤΤ). Τέλος, παρουσιάζονται τα ποσοστά των επιβατών κάθε κατηγορίας (d_0 , d_1 , d_2 , d_{un}) καθώς επίσης και ο μέσος χρόνος διαδρομής των επιβατών (ΑΤΤ).

Η αξιολόγηση θα χρησιμοποιηθεί, για λόγους σύγκρισης, μεταξύ του αρχικού και του τελικού δικτύου.

Στο ίδιο βήμα γίνεται επίσης και υπολογισμός των οχημάτων που είναι απαραίτητα για την λειτουργία του δικτύου, ωστόσο αυτή η διαδικασία θα αναλυθεί παρακάτω. (Κεφάλαιο 5.3.2.5)

4.4.2.3 Υπολογισμός αποστάσεων

Σε αυτό το σημείο υπολογίζονται οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων του δικτύου, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν σε επόμενο στάδιο του προγράμματος. Χρησιμοποιώντας την εντολή numpy έγινε εισαγωγή του αρχείου χρόνου (αρχείο csv) σε μορφή πίνακα δύο διαστάσεων. Με αυτόν τον τρόπο ήταν πιο εύκολη η επεξεργασία των μεταβλητών. Επίσης, δόθηκε μια μέση τιμή ταχύτητας για τα ηλεκτρικά λεωφορεία. Ξέροντας τον χρόνο μεταξύ των κόμβων και την ταχύτητα του οχήματος είναι δυνατόν να υπολογιστεί η απόσταση μεταξύ των κόμβων (σε km).

4.4.2.4 Βελτιστοποίηση με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου

Σε αυτό το βήμα γίνεται βελτιστοποίηση του αρχικού δικτύου με την χρήση του γενετικού αλγορίθμου. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

1. **Αρχικοποίηση πληθυσμού (Initialization):** Εδώ γίνεται η αρχικοποίηση του πληθυσμού, δεδομένου ότι δεν έχει παρουσιαστεί ακόμη ποικιλομορφία και κάθε άτομο του πληθυσμού είναι ίδιο με όλα τα υπόλοιπα. Πρόκειται για ένα αντίγραφο του αρχικού δικτύου. Έτσι, από την αρχή πραγματοποιείται υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης (fitness) για το αρχικό δίκτυο. Το μέγεθος του πληθυσμού εξαρτάται από την παράμετρο popN, η οποία δίνεται από την αρχή ως δεδομένο. Τέλος, το αρχικό δίκτυο αντιγράφεται σε μια μεταβλητή best, η οποία θα περιέχει την βέλτιστη λύση.
2. **Μεταφορά των καλύτερων δικτύων στην νέα γενιά:** Με βάση την τεχνική του ελιτισμού (elitism), αλλά και του αριθμού των βέλτιστων λύσεων (eliteN) ο οποίος δίνεται εξ αρχής από τον χρήστη. Οι βέλτιστες λύσεις μεταφέρονται αυτούσιες στον νέο πληθυσμό.
3. **Επιλογή (Selection):** Για το σύνολο του πληθυσμού αλλά και για αριθμό ίσο με το μισό της διαφοράς του πληθυσμού από τον αριθμό των βέλτιστων λύσεων ($\frac{popN - eliteN}{2}$), προκειμένου ο νέος πληθυσμός να είναι ίδιος σε αριθμό με τον αρχικό, γίνεται επιλογή νέου πληθυσμού με βάση την τεχνική της «ρουλέτας» (roulette wheel). Η τεχνική της «ρουλέτας» κατατάσσει τα άτομα με βάση την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (fitness) και υπολογίζει την πιθανότητα επιλογής του κάθε ατόμου. Η πιθανότητα επιλογής υπολογίζεται με βάση το fitness διαιρεμένη με το άθροισμα όλων των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης. Στην συνέχεια επιλέγεται ένας τυχαίος αριθμός r στο διάστημα $[0, 1]$ και οι τιμές της πιθανότητας προστίθενται με την σειρά μέχρι το άθροισμά τους να ξεπεράσει τον τυχαίο αριθμό r . Η τελευταία αυτή τιμή της πιθανότητας που προστέθηκε αντιστοιχεί στο άτομο που επιλέχθηκε ως «γονέας» από την τεχνική της «ρουλέτας». Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται και δεύτερη φορά προκειμένου να επιλεχθεί και ο δεύτερος «γονέας».
4. **Διασταύρωση (Crossover):** Αφού βρέθηκαν οι «γονείς» σειρά έχει η διαδικασία της διασταύρωσης (crossover). Επιλέγεται ένας τυχαίος πραγματικός αριθμός r στο διάστημα $[0, 1]$ κι αν είναι μικρότερος από τον τελεστή διασταύρωσης p_{swap} τότε πραγματοποιείται η διαδικασία. Η τιμή του p_{swap} δίνεται από τον χρήστη στην αρχή του

προγράμματος. Όταν ο αριθμός $r < p_{\text{swap}}$, επιλέγεται τυχαία ένας ακέραιος αριθμός στο διάστημα $[0, \text{routeN} - 1]$. Ο αριθμός αυτός καθορίζει το σημείο που θα γίνει η διασταύρωση μεταξύ των δύο «γονέων», δηλαδή των δύο γραμμών. Τα δύο νέα δίκτυα που προκύπτουν αποτελούν τους «απογόνους» ή «παιδιά». (ch_1, ch_2)

5. **Μετάλλαξη (Mutation):** Στην συνέχεια εφαρμόζεται ο τελεστής μετάλλαξης (mutation). Η διαδικασία της μετάλλαξης μπορεί να διαχωριστεί σε δύο (2) κατηγορίες:

- **Μικρής τροποποίησης (small modification):** Σε αυτήν την περίπτωση με την μέθοδο της «ρουλέτας» επιλέγεται μία γραμμή από το δίκτυο, με πιθανότητα το αντίστροφο της ζήτησης των επιβατών που μπορούν να ικανοποιηθούν απευθείας. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα να επιλεγούν οι «χειρότερες» γραμμές, δηλαδή εκείνες με το μικρότερο ποσοστό ικανοποιημένων επιβατών χωρίς μετεπιβιβάσεις. Έπειτα, επιλέγεται τυχαία ένας ακέραιος αριθμός στο διάστημα $[0, 1]$ με βάση τον οποίο τροποποιείται η αφετηρία ή το τέρμα της γραμμής. Στην συνέχεια, με βάση την πιθανότητα p_{del} , η οποία ορίζεται εξ αρχής, επιλέγεται τυχαία ένας πραγματικός αριθμός στο διάστημα $[0, 1]$. Αν ο τυχαίος αριθμός είναι μικρότερος από την πιθανότητα p_{del} , τότε ο κόμβος αφαιρείται από την γραμμή. Αντίθετα, αν είναι μεγαλύτερος, τότε επιλέγεται τυχαία ένας γειτονικός κόμβος που δεν υπάρχει και προστίθεται στην γραμμή. Εάν δεν υπάρχει κάποιος γειτονικός κόμβος, τότε η γραμμή παραμένει ίδια, χωρίς καμία αλλαγή.
- **Μεγάλης τροποποίησης (big modification):** Με παρόμοιο τρόπο επιλέγεται η αφετηρία ή το τέρμα της γραμμής για μετάλλαξη. Έπειτα, καταγράφονται οι συντομότερες διαδρομές από και προς το επιλεγμένο κόμβο με βάση τον αλγόριθμο Dijkstra και κατατάσσονται σε φθίνουσα σειρά ανάλογα με την ζήτηση των μετακινούμενων επιβατών χωρίς μετεπιβιβάσεις. Στην συνέχεια, με την τεχνική της «ρουλέτας» και με πιθανότητα που προκύπτει από τους απευθείας ικανοποιημένους επιβάτες επιλέγεται η νέα γραμμή του δικτύου. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει εναλλακτική γραμμή, λόγω μηδενικής ζήτησης, τότε επιλέγεται ο άλλος κόμβος για μετάλλαξη. Δηλαδή, αν αρχικά είχε επιλεγεί η αφετηρία διαλέγεται στην συνέχεια το τέρμα της διαδρομής ή το αντίστροφο.

Η πιθανότητα p_{ms} είναι εκείνη που καθορίζει τον τύπο τροποποίησης που θα εφαρμοστεί, πρόκειται δηλαδή να χρησιμοποιηθεί μετάλλαξη μικρής τροποποίησης (small modification). Η μετάλλαξη μεγάλης τροποποίησης (big modification) χρησιμοποιείται για την αποφυγή εγκλωβισμού σε τοπικά μέγιστα και γενικά παρουσιάζει πολύ μεγάλες αλλαγές για να συνεχίσει την αναζήτηση καλύτερων λύσεων. Η διαδικασία της μετάλλαξης πρέπει να πραγματοποιηθεί δύο (2) φορές, για κάθε ένα «απόγονο» ή «παιδί» ξεχωριστά.

6. **Αξιολόγηση νέων δικτύων:** Τα «παιδιά» που προήλθαν από τις προηγούμενες διαδικασίες αξιολογούνται προκειμένου να βρεθεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στην συνέχεια. Προστίθονται στον νέο πληθυσμό και εν συνεχεία γίνεται κατάταξη του νέου πληθυσμού με βάση την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (fitness).
7. **Έλεγχος καλύτερης λύσης:** Κάθε τιμή που προκύπτει από την αντικειμενική συνάρτηση συγκρίνεται από την τιμή που υπάρχει στην μεταβλητή best. Εάν η τιμή που προήλθε από την αντικειμενική συνάρτηση (fitness) είναι μικρότερη από την υπάρχουσα τιμή της μεταβλητής best, τότε αυτό σημαίνει ότι βρέθηκε καλύτερη λύση επομένως αλλάζει η τιμή της μεταβλητής best.
8. **Συνθήκη τερματισμού:** Στην συγκεκριμένη εργασία σαν συνθήκη τερματισμού επιλέχθηκε εκείνη του αριθμού των επαναλήψεων. Έτσι, από την αρχή του προγράμματος δόθηκε ότι ο αριθμός των επαναλήψεων του γενετικού αλγορίθμου θα είναι εκατόν πενήντα (150). Στο τέλος του γενετικού αλγορίθμου επιστρέφεται στο κυρίως πρόγραμμα η μεταβλητή best που περιέχει το καινούργιο δίκτυο.

4.4.2.5 *Αξιολόγηση τελικού δικτύου και υπολογισμός οχημάτων*

Σε αυτό το βήμα αρχικά γίνεται αξιολόγηση του νέου δικτύου που δημιουργήθηκε με την βοήθεια του γενετικού αλγορίθμου. Για την αξιολόγηση του τελικού δικτύου ακολουθείται η ίδια διαδικασία που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4.4.2.2. Εκτός όμως από την αξιολόγηση του δικτύου, σε αυτό το βήμα γίνεται και υπολογισμός των οχημάτων που είναι απαραίτητα για την σωστή λειτουργία του δικτύου.

Από την αξιολόγηση που έγινε είναι γνωστές οι φορτίσεις σε κάθε κόμβο, δηλαδή η ζήτηση. Με βάση την ζήτηση αυτή και την μέγιστη φόρτιση της κάθε γραμμής υπολογίζεται η απαραίτητη συχνότητα διέλευσης των λεωφορείων. Θεωρήθηκε ότι θα χρησιμοποιηθούν δύο (2) ειδών λεωφορεία. Τα τυπικά λεωφορεία ογδόντα (80) θέσεων και τα αρθρωτά λεωφορεία εκατόν είκοσι θέσεων (120).

Αρχικά, για τα **τυπικά λεωφορεία ογδόντα (80) θέσεων**. Αν διαιρεθεί η μέγιστη φόρτιση με τον αριθμό των θέσεων του λεωφορείου προκύπτει ο απαραίτητος αριθμός των οχημάτων ανά ώρα. (θεωρήθηκε ότι ο Πίνακας Προέλευσης – Προορισμού δίνει τις μέγιστες ωριαίες φορτίσεις) Εάν ο αριθμός είναι μεγαλύτερος από 12 οχήματα την ώρα, δηλαδή η χρονοαπόσταση είναι μικρότερη των πέντε (5) λεπτών, τότε επιλέγονται αρθρωτά λεωφορεία για την συγκεκριμένη γραμμή και ο υπολογισμός για την συχνότητα των λεωφορείων επαναλαμβάνεται. Στην συνέχεια, για κάθε γραμμή υπολογίζεται ο χρόνος διαδρομής ο οποίος πολλαπλασιάζεται με έναν αριθμό, ίσο με το 2,2. Πρόκειται για τον χρόνο διαδρομής για την μία κατεύθυνση αλλά και την άλλη, όπως επίσης προστίθεται ένα 10% σε κάθε κατεύθυνση ως χρόνος επαναφοράς. Έπειτα, με βάση τον χρόνο διαδρομής καθώς και την συχνότητα διέλευσης, είναι δυνατόν να υπολογιστεί ο αριθμός των λεωφορείων που είναι απαραίτητα.

Στα αποτελέσματα παρουσιάζεται για κάθε γραμμή ο αριθμός των οχημάτων, ο τύπος του οχήματος, η συχνότητα διέλευσης, η μέγιστη φόρτιση καθώς και ο χρόνος διαδρομής.

4.4.2.6 Υπολογισμός κόστους κατασκευής ηλεκτρικού δικτύου

Το τελευταίο βήμα του προγράμματος είναι ο υπολογισμός του κόστους υλοποίησης του καινούργιου δικτύου. Θεωρήθηκε ότι θα χρειαστεί να αγοραστεί καινούργιος εξοπλισμός για όλες τις απαιτήσεις του δικτύου.

Αρχικά, για κάθε γραμμή του δικτύου υπολογίζεται το μήκος διαδρομής. Εάν το μήκος διαδρομής είναι μικρότερο από την μέγιστη απόσταση που μπορεί να διανύσει ένα ηλεκτρικό λεωφορείο τότε θεωρείται ότι η γραμμή θα γίνει ηλεκτρική και δημιουργείται ένας πίνακας που στην θέση της συγκεκριμένης γραμμής θα έχει την τιμή '0'. Αντίθετα, εάν το μήκος διαδρομής είναι μεγαλύτερο από την μέγιστη απόσταση τότε θεωρείται ότι η γραμμή θα ικανοποιείται από πετρελαιοκίνητα λεωφορεία και ο πίνακας παίρνει την τιμή '1'.

Η μέγιστη απόσταση που μπορεί να διανύσει ένα ηλεκτρικό όχημα είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας διά την κατανάλωση ενέργειας επί έναν συντελεστή 0.7. Η μπαταρία ενός ηλεκτρικού λεωφορείου δεν μπορεί να φορτιστεί στο μέγιστο εκατό τις εκατό (100%), αλλά επίσης δεν μπορεί να αποφορτιστεί τελείως. Για αυτό το λόγο θεωρήθηκε ότι το μέγιστο ποσοστό φόρτισης της μπαταρίας είναι ενενήντα τοις εκατό (90%) και το ελάχιστο είναι το είκοσι τοις εκατό (20%). Με αυτή την θεώρηση προκύπτει πως το λειτουργικό ποσοστό της μπαταρίας είναι εβδομήντα τοις εκατό (70%).

Στην συνέχεια, για τις γραμμές που προέκυψε ότι θα αποτελούνται από ηλεκτρικά λεωφορεία, αντιγράφεται σε μια λίστα η αφετηρία και το τέρμα της διαδρομής, δηλαδή οι θέσεις που θα χρειαστεί να μπουν οι φορτιστές. Έπειτα, για κάθε γραμμή υπολογίζεται το κόστος της. Εάν η γραμμή αποτελείται από πετρελαιοκίνητα λεωφορεία το κόστος είναι ίσο με τον αριθμό των λεωφορείων που είναι απαραίτητα επί το κόστος αγοράς (≈ 225000 €). Εάν η γραμμή πρόκειται να γίνει ηλεκτρική εκτός από το κόστος αγοράς των λεωφορείων, συνυπολογίζεται το κόστος αγοράς των μπαταριών καθώς και το κόστος των φορτιστών. Το κόστος αγοράς των ηλεκτρικών λεωφορείων χωρίς την μπαταρία είναι ίσο με τον αριθμό των λεωφορείων που χρειάζεται η συγκεκριμένη γραμμή επί την τιμή αγοράς (≈ 350000 €). Το κόστος αγοράς των μπαταριών είναι ίσο με τον αριθμό των λεωφορείων επί την χωρητικότητα της μπαταρίας επί την τιμή αγοράς της μπαταρίας (≈ 800 €/kWh). Τέλος, είναι ο υπολογισμός του κόστους των φορτιστών, οι οποίοι θα τοποθετηθούν στον κόμβο αρχής και στον κόμβο τέλους κάθε γραμμής. Προκειμένου, όμως, να μην γίνει υπερκοστολόγηση του έργου πρέπει να γίνει έλεγχος στις θέσεις των φορτιστών, ότι δεν υπάρχουν κοινοί κόμβοι αρχής ή τέλους. Αυτό πραγματοποιήθηκε εύκολα με την εντολή set. Επομένως, το κόστος των φορτιστών είναι ο τελικός αριθμός των κόμβων επί την τιμή αγοράς (≈ 60000 €).

Σαν αποτέλεσμα το πρόγραμμα εμφανίζει για κάθε γραμμή του δικτύου το κόστος αγοράς των πετρελαιοκίνητων λεωφορείων, το κόστος αγοράς των ηλεκτρικών λεωφορείων καθώς και το κόστος για την αγορά των μπαταριών. Επίσης, εμφανίζει τον αριθμό των φορτιστών που είναι απαραίτητοι για την σωστή λειτουργία του δικτύου καθώς και το κόστος αγοράς τους.

5 Πειράματα – Αποτελέσματα

Για την επίλυση του προβλήματος σχεδιασμού χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία και περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.4. Η επίλυση πραγματοποιήθηκε για δεδομένο αρχικό δίκτυο έξι (6) διαδρομών. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται σε τρία (3) βήματα:

1. Επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων
2. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης
3. Ανάλυση ευαισθησίας

5.1 Επίλυση δικτύου Mandl - 6 διαδρομών

Για την επίλυση του δικτύου πρέπει να οριστούν κάποιες παράμετροι, οι οποίες δίνονται στο πρόγραμμα εκ των προτέρων. Πρόκειται για παραμέτρους που διαμορφώνουν την αρχική μορφή του δικτύου, καθώς και κάποιες παραμέτρους σχετικά με τον γενετικό αλγόριθμο.

Οι αρχικές παράμετροι του προβλήματος είναι:

Πίνακας 5.1 - Παράμετροι Προβλήματος		
Παράμετρος	Συμβολισμός	Τιμή
Αριθμός διαδρομών	N	6
Ελάχιστοι κόμβοι διαδρομής	S _{min}	4
Μέγιστοι κόμβοι διαδρομής	S _{max}	8
Ποινή μετεπιβίβασης (min)	penalty _{transf}	5

Οι παράμετροι του γενετικού αλγορίθμου είναι:

Πίνακας 5.2 – Παράμετροι Γενετικού Αλγορίθμου		
Παράμετρος	Συμβολισμός	Τιμή
Μέγεθος πληθυσμού	popN	20
Μέγεθος elite	eliteN	8
Αριθμός επαναλήψεων	iterN	150
Συντελεστής διασταύρωσης	$\rho_{\text{swap}} = \frac{1}{\text{lineN}}$	0,17
Συντελεστής μικρής τροποποίησης	ρ_{ms}	0,9
Συντελεστής διαγραφής κόμβου	ρ_{del}	0,4
Ταχύτητα λεωφορείου	V (km/h)	15
Χωρητικότητα μπαταρίας	battery _{cap} (kWh)	90
Κατανάλωση ενέργειας	energy _{cons} (kWh/km)	1,5
Μέγιστη απόσταση που μπορεί να διανύσει το λεωφορείο	$\max_d = \frac{0.7 * \text{battery_cap}}{\text{energy_cons}}$ (km)	42

Ποσοστό συμμετοχής κόστους επιβατών	penalty1	0,8
Ποσοστό συμμετοχής κόστους ηλεκτρικού δικτύου	Penalty2	0,5
Κόστος σταθμών φόρτισης	$cost_{charging_stations}$ (€)	60000

5.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

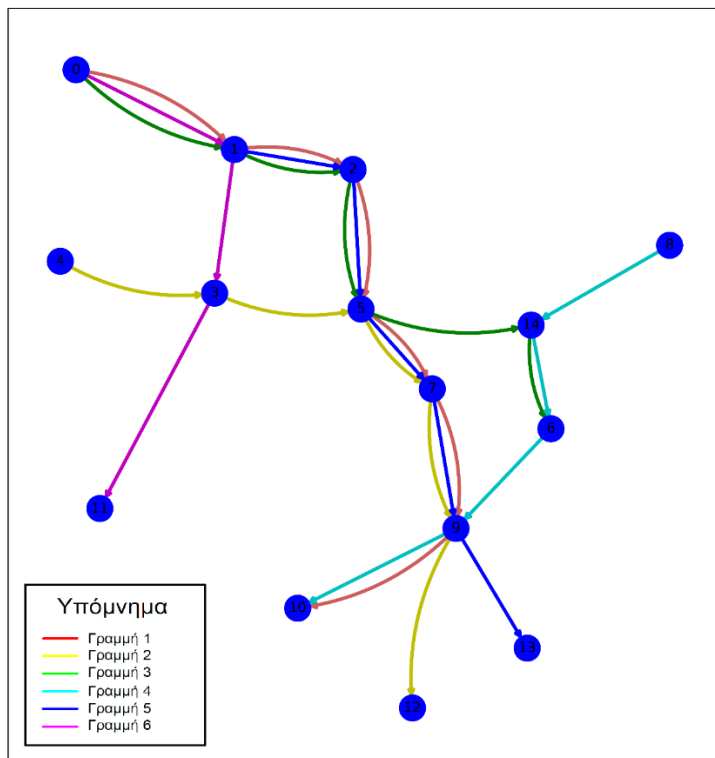
Τα αποτελέσματα από την ανάλυση δικτύου με έξι (6) διαδρομές, αφορούν την αξιολόγηση του αρχικού δικτύου όσο και του τελικού για το σύνολο των επιβατών, και παρουσιάζονται παρακάτω.

Το αρχικό δίκτυο είναι:

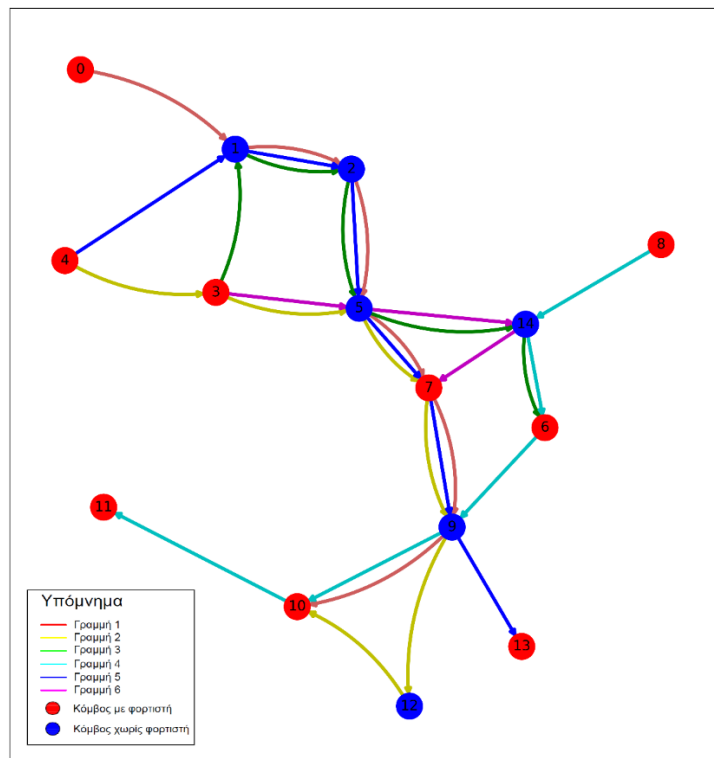
Γραμμή 1	0	1	2	5	7	9	10	
Γραμμή 2	4	3	5	7	9	12		
Γραμμή 3	0	1	2	5	14	6		
Γραμμή 4	8	14	6	9	10			
Γραμμή 5	1	2	5	7	9	13		
Γραμμή 6	0	1	3	11				

Το τελικό δίκτυο που προκύπτει μετά την βελτιστοποίηση είναι:

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



Σχήμα 5.1 – Αρχικό Δίκτυο Mandl



Σχήμα 5.2 - Τελικό Δίκτυο Mandl

Από την ανάλυση του δικτύου προκύπτει ότι στο τελικό δίκτυο χρειάζεται να μπου εννέα (9) φορτιστές για να εξυπηρετείται όλο το δίκτυο από ηλεκτρικά λεωφορεία. Συγκεκριμένα, φορτιστές χρειάζεται να μπου στους κόμβους:

{0, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 13}

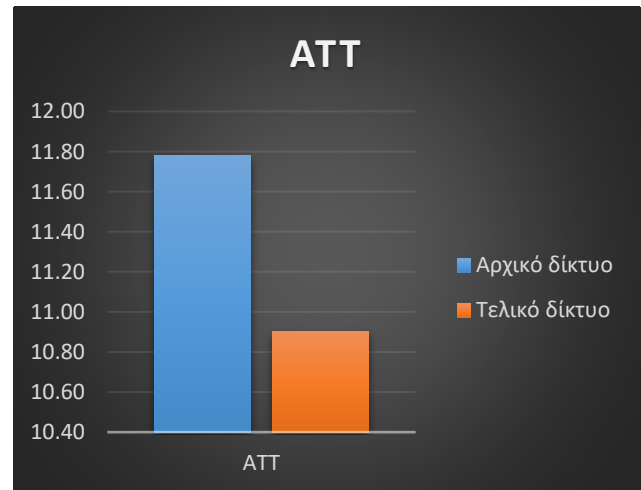
Πίνακας 5.5 – Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Βασικού Σεναρίου		
Μέγεθος	Αρχικό δίκτυο	Τελικό δίκτυο
ΑΤΤ	11,78	10,90
d_0	84,52	89,79
d_1	14,90	9,70
d_2	0,58	0,51
d_{un}	0,00	0,00

Από την αξιολόγηση του αρχικού και του τελικού δικτύου παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα είναι βελτιωμένα. Ο αλγόριθμος παράγει ένα καινούργιο δίκτυο που μειώνει τον μέσο χρόνο μετακίνησης των επιβατών και το ποσοστό των επιβατών που εξυπηρετούνται με μία ή δύο μετακινήσεις. Αν και δεν μηδενίζονται οι μετακινήσεις με μετεπιβιβάσεις, το νέο δίκτυο είναι σαφώς καλύτερο από το αρχικό.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα για την εποπτική αποτύπωση των αποτελεσμάτων του των ποσοστών της εξυπηρετούμενης ζήτησης, των αντίστοιχων επιβατών καθώς και του μέσου χρόνου διαδρομής.



Διάγραμμα 5.1 – Ποσοστά επιβατών αρχικού – τελικού δικτύου



Διάγραμμα 5.2 – Μέσος χρόνος διαδρομής αρχικού – τελικού δικτύου

Έπειτα, γίνεται παρουσίαση των φορτίσεων ανά κόμβο σε κάθε γραμμή του τελικού δικτύου (Πίνακας 5.6) καθώς και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του (Πίνακας 5.7), με βάση την εξυπηρετούμενη ζήτηση.

Πίνακας 5.6 – Φορτίσεις Τελικού Δικτύου								
Γρ. 1	0	1	2	5	7	9	10	
	2628	1916	1734	1922	1902	1104		
Γρ. 2	4	3	5	7	9	12	10	
	638	1352	1778	1874	1256	360		
Γρ. 3	3	1	2	5	14	6		
	540	608	892	998	910			
Γρ. 4	8	14	6	9	10	11		
	614	410	1330	1448	1024			
Γρ. 5	4	1	2	5	7	9	13	
	320	514	638	1076	1134	586		
Γρ. 6	3	5	14	7				
	154	86	130					

Πίνακας 5.7 – Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Τελικού Δικτύου					
	Κύκλος (min)	Συχνότητα (veh/h)	Αρ. οχημάτων (veh)	Τύπος οχήματος (N/A)	Μέγ. Μεταφορική ικανότητα (pas/h)
Γρ. 1	28	18	19	A	2700
Γρ. 2	33	13	16	A	1950
Γρ. 3	13	7	4	A	1050
Γρ. 4	32	10	12	A	1500
Γρ. 5	29	8	9	A	1200
Γρ. 6	9	2	1	N	160

Τέλος, παρουσιάζεται το συνολικό κόστος κάθε γραμμής για την απόκτηση λεωφορείων και μπαταριών καθώς και το συνολικό κόστος των φορτιστών (Πίνακας 5.8).

Πίνακας 5.8 – Κόστος Τελικού Δικτύου				
	Λεωφορείο	Ηλεκτρικό λεωφορείο	Μπαταρία	Φορτιστές
Γραμμή 1	0	6.650.000	1.368.000	540.000
Γραμμή 2	0	5.600.000	1.152.000	
Γραμμή 3	0	1.400.000	288.000	
Γραμμή 4	0	4.200.000	864.000	
Γραμμή 5	0	3.150.000	658.000	
Γραμμή 6	0	350.000	72.000	

5.3 Ανάλυση Ευαισθησίας Παραμέτρων

Η ανάλυση ευαισθησίας έγινε για να περιγραφεί ο τρόπος με τον οποίο, η κάθε παράμετρος, επηρεάζει τα αποτελέσματα του προγράμματος. Προκειμένου να γίνει η ανάλυση ευαισθησίας επιλέχθηκαν κάποιες παράμετροι που επηρεάζουν τον γενικό αλγόριθμο, οι οποίες αυξήθηκαν ή μειώθηκαν ανάλογα με το μέγεθός τους. Με κάθε τροποποιημένη παράμετρο έγινε η επίλυση του προγράμματος και καταγράφηκαν τα αποτελέσματα. Για την συγκεκριμένη ανάλυση οι παράμετροι που επιλέχθηκαν είναι:

1. Ποσοστό κόστους ηλεκτρικού δικτύου: $penalty_2 = 0.5 - 1.5$ με βήμα 0.5
2. Κόστος σταθμών φόρτισης (€): $cost_{charging_stations} = 30000 - 100000$ με βήμα 10000
3. Χωρητικότητα μπαταρίας (kWh): $battery_{cap} = 60 - 100$ με βήμα 10
4. Κατανάλωση ενέργειας (kWh/km): $energy_{cons} = 1.5 - 2.5$ με βήμα 0.5

Για πρακτικούς λόγους, για κάθε μια παράμετρο θα παρουσιαστεί η βέλτιστη λύση που προέκυψε. Τα αναλυτικά αποτελέσματα όλων των δοκιμών επισυνάπτονται στο παράρτημα.

5.3.1 Ποσοστό κόστους ηλεκτρικού δικτύου

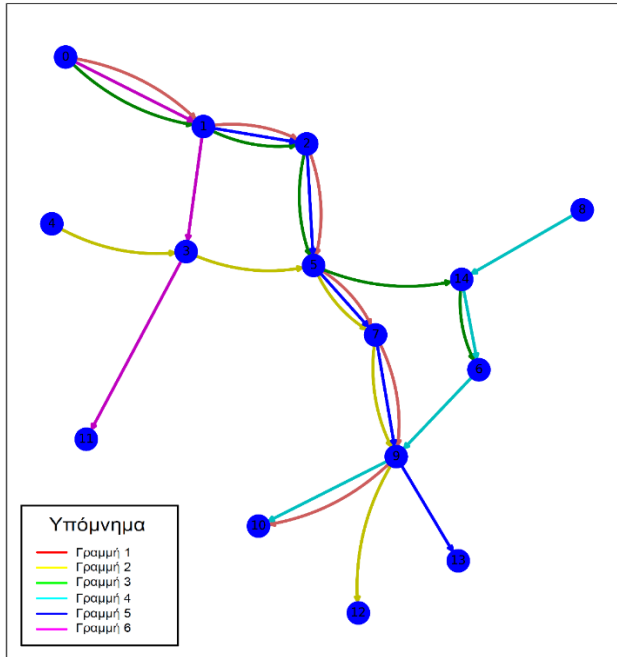
Πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας ως προς το ποσοστό κόστους ηλεκτρικού δικτύου. Δηλαδή, σε τι ποσοστό λαμβάνεται υπόψη το κόστος του ηλεκτρικού δικτύου στην ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Οι τιμές που έλαβε είναι $\text{penalty2} = 0.5 - 1.5$ με βήμα 0.5. Η τιμή του $\text{penalty2} = 0.5$ ήταν μια από τις παραμέτρους του βασικού σεναρίου και παρουσιάστηκε παραπάνω. Η επόμενη βέλτιστη λύση παρουσιάστηκε όταν το $\text{penalty2} = 0.6$.

Το αρχικό δίκτυο είναι:

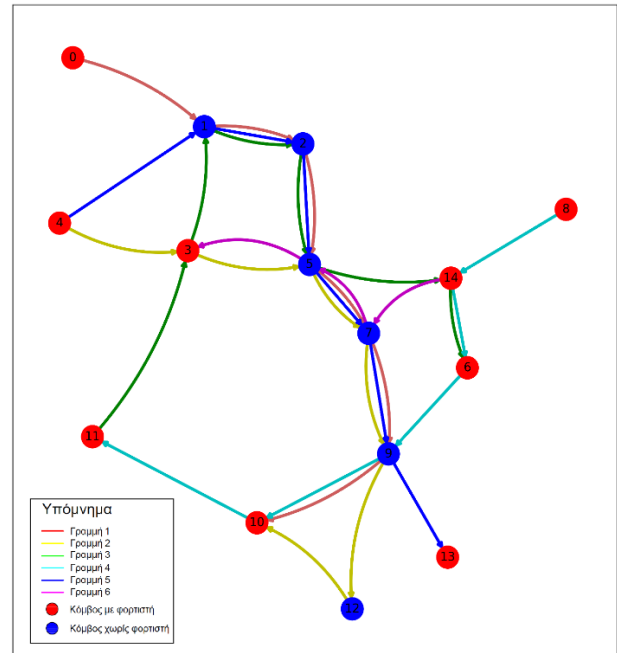
Πίνακας 5.9 – Αρχικό Δίκτυο Mandl								
Γραμμή 1	0	1	2	5	7	9	10	
Γραμμή 2	4	3	5	7	9	12		
Γραμμή 3	0	1	2	5	14	6		
Γραμμή 4	8	14	6	9	10			
Γραμμή 5	1	2	5	7	9	13		
Γραμμή 6	0	1	3	11				

Το τελικό δίκτυο που προκύπτει μετά την βελτιστοποίηση είναι:

Πίνακας 5.10 – Τελικό Δίκτυο Mandl $\text{penalty2} = 0.6$								
Γραμμή 1	0	1	2	5	7	9	10	
Γραμμή 2	4	3	5	7	9	12	10	
Γραμμή 3	11	3	1	2	5	14	6	
Γραμμή 4	8	14	6	9	10	11		
Γραμμή 5	4	1	2	5	7	9	13	
Γραμμή 6	14	7	5	3				



Σχήμα 5.3 – Αρχικό Δίκτυο Mandl



Σχήμα 5.4 – Τελικό Δίκτυο για $penalty2 = 0.6$

Από την ανάλυση του δικτύου προκύπτει ότι στο τελικό δίκτυο χρειάζεται να μπουν εννέα (9) φορτιστές για να εξυπηρετείται όλο το δίκτυο από ηλεκτρικά λεωφορεία. Συγκεκριμένα, φορτιστές χρειάζεται να μπουν στους κόμβους:

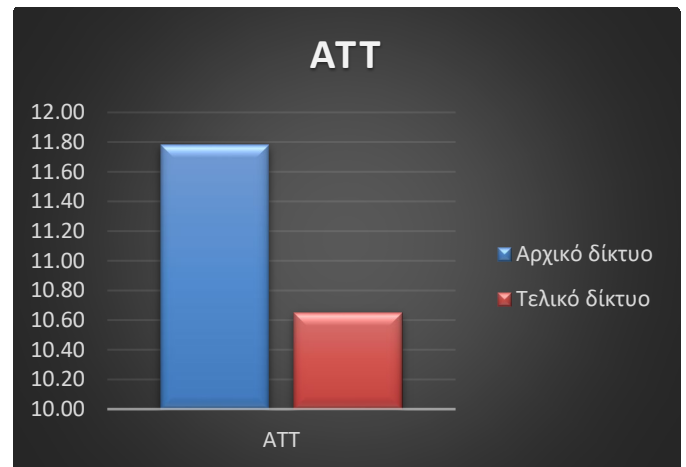
{0, 3, 4, 6, 8, 10, 11, 13, 14}

Πίνακας 5.11 - Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης με $penalty2 = 0.6$		
Μέγεθος	Αρχικό δίκτυο	Τελικό δίκτυο
ΑΤΤ	11,78	10,65
d_0	84,52	90,56
d_1	14,90	8,93
d_2	0,58	0,51
d_{un}	0,00	0,00

Στην συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα για την εποπτική αποτύπωση των αποτελεσμάτων του των ποσοστών της εξυπηρετούμενης ζήτησης, των αντίστοιχων επιβατών καθώς και του μέσου χρόνου διαδρομής.



Διάγραμμα 5.3 – Ποσοστά επιβατών αρχικού – τελικού δικτύου



Διάγραμμα 5.4 – Μέσος χρόνος διαδρομής αρχικού – τελικού δικτύου για $penalty2 = 0.6$

Έπειτα, γίνεται παρουσίαση των φορτίσεων ανά κόμβο σε κάθε γραμμή του τελικού δικτύου (Πίνακας 5.12) καθώς και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του (Πίνακας 5.13), με βάση την εξυπηρετούμενη ζήτηση.

Γρ. 1	0	1	2	5	7	9	10
	2634	1854	1654	1814	1810	1054	
Γρ. 2	4	3	5	7	9	12	10
	640	1224	1624	1776	1256	360	
Γρ. 3	11	3	1	2	5	14	6
	220	660	664	934	1060	910	
Γρ. 4	8	14	6	9	10	11	
	620	410	1330	1286	820		
Γρ. 5	4	1	2	5	7	9	13
	320	508	626	1042	1114	588	
Γρ. 6	14	7	5	3			
	160	154	218				

	Κύκλος (min)	Συχνότητα (veh/h)	Αρ. οχημάτων (veh)	Τύπος οχήματος (N/A)	Μέγ. Μεταφορική ικανότητα (pas/h)
Γρ. 1	28	18	19	A	2700
Γρ. 2	33	12	15	A	1800
Γρ. 3	23	8	7	A	1200
Γρ. 4	32	9	11	A	1350
Γρ. 5	29	8	9	A	1200

Γρ. 6	8	3	1	N	240
-------	---	---	---	---	-----

Τέλος, παρουσιάζεται το συνολικό κόστος κάθε γραμμής για την απόκτηση λεωφορείων και μπαταριών καθώς και το συνολικό κόστος των φορτιστών (Πίνακας 5.14).

Πίνακας 5.14 – Κόστος Τελικού Δικτύου για $penalty2 = 0.6$				
	Λεωφορείο	Ηλεκτρικό λεωφορείο	Μπαταρία	Φορτιστές
Γραμμή 1	0	6.650.000	1.368.000	540.000
Γραμμή 2	0	5.250.000	1.080.000	
Γραμμή 3	0	2.450.000	504.000	
Γραμμή 4	0	3.850.000	792.000	
Γραμμή 5	0	3.150.000	658.000	
Γραμμή 6	0	350.000	72.000	

5.3.2 Κόστος σταθμών φόρτισης (€)

Έγινε ανάλυση ευαισθησίας ως προς την παράμετρο του κόστους των σταθμών φόρτισης (€). Οι τιμές για τις οποίες έγιναν οι δοκιμές είναι από 30.000 έως 100.000 με βήμα 10.000

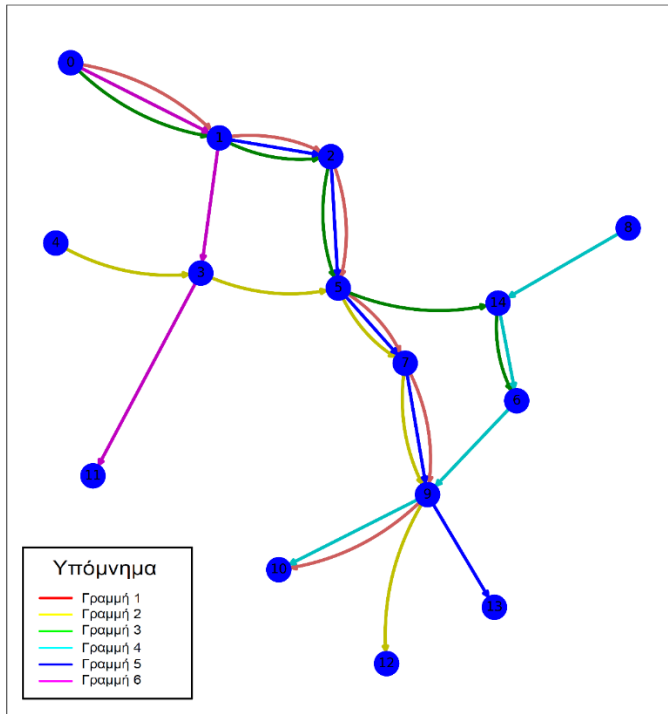
Η βέλτιστη λύση παρουσιάστηκε όταν το $cost_{charging_stations} = 40000$ €.

Το αρχικό δίκτυο είναι:

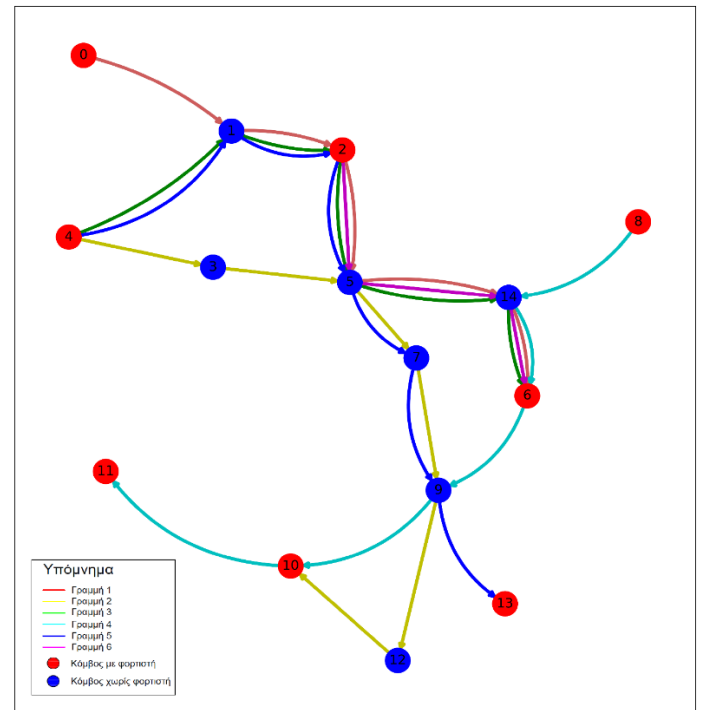
Πίνακας 5.15 – Αρχικό Δίκτυο Mandl								
Γραμμή 1	0	1	2	5	7	9	10	
Γραμμή 2	4	3	5	7	9	12		
Γραμμή 3	0	1	2	5	14	6		
Γραμμή 4	8	14	6	9	10			
Γραμμή 5	1	2	5	7	9	13		
Γραμμή 6	0	1	3	11				

Το τελικό δίκτυο που προκύπτει μετά την βελτιστοποίηση είναι:

Πίνακας 5.16 – Τελικό Δίκτυο για $cost_{charging_stations} = 40000$								
Γραμμή 1	0	1	2	5	14	6		
Γραμμή 2	4	3	5	7	9	12	10	
Γραμμή 3	4	1	2	5	14	6		
Γραμμή 4	8	14	6	9	10	11		
Γραμμή 5	4	1	2	5	7	9	13	
Γραμμή 6	2	5	14	6				



Σχήμα 5.5 – Αρχικό Δίκτυο Mandl



Σχήμα 5.6 – Τελικό Δίκτυο για $cost_{charging_stations} = 40000 \text{ €}$

Από την ανάλυση του δικτύου προκύπτει ότι στο τελικό δίκτυο χρειάζεται να μπου οκτώ (8) φορτιστές για να εξυπηρετείται όλο το δίκτυο από ηλεκτρικά λεωφορεία. Συγκεκριμένα, φορτιστές χρειάζεται να μπου στους κόμβους:

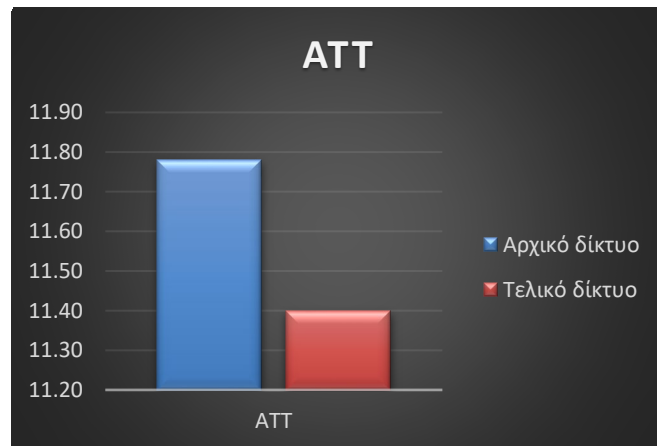
{0, 2, 4, 6, 8, 10, 11, 13}

Πίνακας 5.17 – Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης με $cost_{charging_stations} = 40000 \text{ €}$		
Μέγεθος	Αρχικό δίκτυο	Τελικό δίκτυο
ATT	11,78	11,4
d_0	84,52	83,24
d_1	14,90	16,38
d_2	0,58	0,39
d_{un}	0,00	0,00

Στην συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα για την εποπτική αποτύπωση των αποτελεσμάτων του των ποσοστών της εξυπηρετούμενης ζήτησης, των αντίστοιχων επιβατών καθώς και του μέσου χρόνου διαδρομής.



Διάγραμμα 5.5 – Ποσοστά επιβατών αρχικού – τελικού δικτύου ($cost_{charging_stations} = 40000 \text{ €}$)



Διάγραμμα 5.6 – Μέσος χρόνος διαδρομής αρχικού – τελικού δικτύου ($cost_{charging_stations} = 40000 \text{ €}$)

Έπειτα, γίνεται παρουσίαση των φορτίσεων ανά κόμβο σε κάθε γραμμή του τελικού δικτύου (Πίνακας 5.18) καθώς και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του (Πίνακας 5.19), με βάση την εξυπηρετούμενη ζήτηση.

Γρ. 1	0	1	2	5	14	6		
	2632	1896	1530	660	484			
Γρ. 2	4	3	5	7	9	12	10	
	570	1972	2454	2616	1282	340		
Γρ. 3	4	1	2	5	14	6		
	230	470	560	412	330			
Γρ. 4	8	14	6	9	10	11		
	612	414	1438	2544	1036			
Γρ. 5	4	1	2	5	7	9	13	
	160	930	1410	2346	2208	586		
Γρ. 6	2	5	14	6				
	182	238	190					

	Κύκλος (min)	Συχνότητα (veh/h)	Αρ. οχημάτων (veh)	Τύπος οχήματος (N/A)	Μέγ. Μεταφορική ικανότητα (pas/h)
Γρ. 1	18	18	12	A	2700
Γρ. 2	33	18	22	A	2700
Γρ. 3	16	7	5	N	560
Γρ. 4	32	17	20	A	2550

Γρ. 5	29	16	18	A	2400
Γρ. 6	8	3	1	N	240

Τέλος, παρουσιάζεται το συνολικό κόστος κάθε γραμμής για την απόκτηση λεωφορείων και μπαταριών καθώς και το συνολικό κόστος των φορτιστών (Πίνακας 5.20).

Πίνακας 5.20 – Κόστος Τελικού Δικτύου ($cost_{charging_stations} = 40000 \text{ €}$)				
	Λεωφορείο	Ηλεκτρικό λεωφορείο	Μπαταρία	Φορτιστές
Γραμμή 1	0	4.200.000	864.000	320.000
Γραμμή 2	0	7.700.000	1.584.000	
Γραμμή 3	0	1.750.000	360.000	
Γραμμή 4	0	7.000.000	1.440.000	
Γραμμή 5	0	6.300.000	1.296.000	
Γραμμή 6	0	350.000	72.000	

5.3.3 Χωρητικότητα μπαταρίας (kWh)

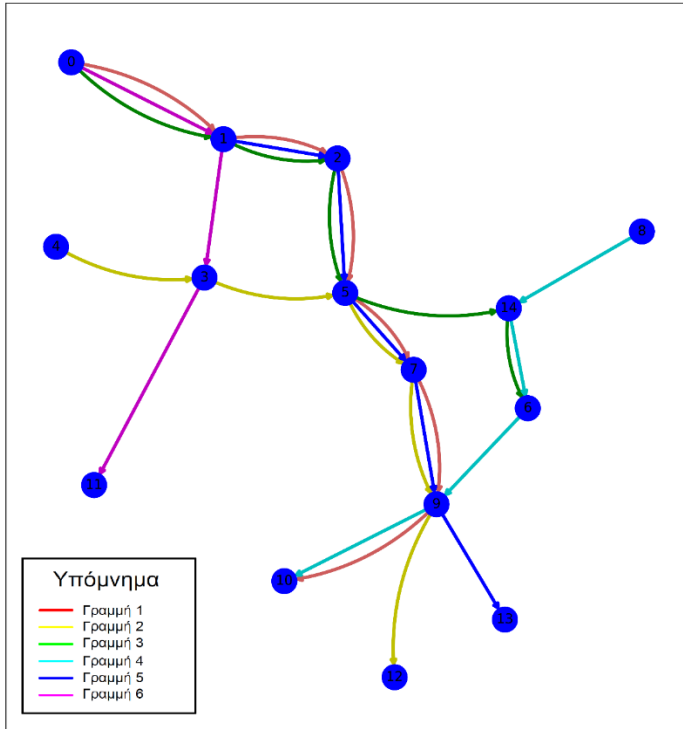
Πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας ως προς την χωρητικότητα μπαταρίας (kWh) των ηλεκτρικών λεωφορείων. Οι τιμές είχαν από 60 έως 100 με βήμα 10. Η βέλτιστη λύση παρουσιάστηκε όταν η χωρητικότητα της μπαταρίας ήταν $battery_{cap} = 60 \text{ kWh}$.

Το αρχικό δίκτυο είναι:

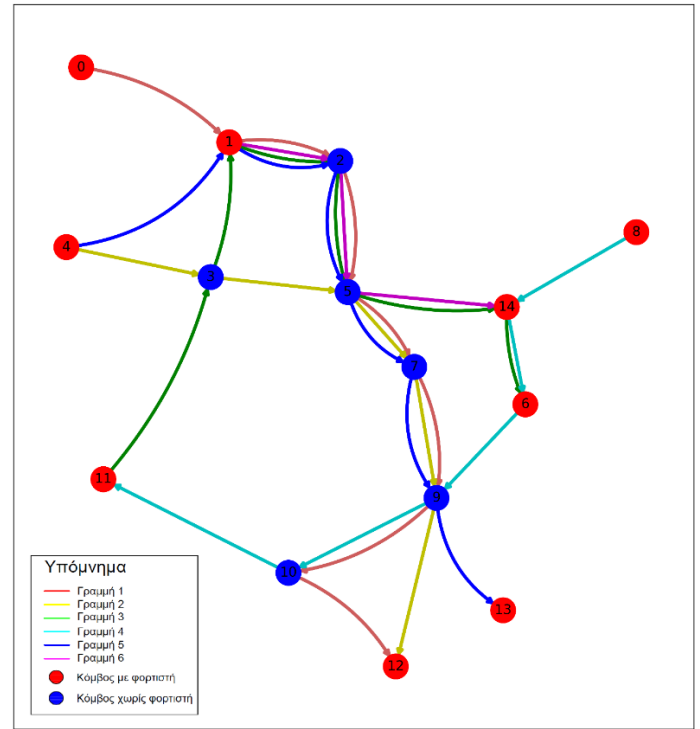
Πίνακας 5.21 – Αρχικό Δίκτυο Mandl								
Γραμμή 1	0	1	2	5	7	9	10	
Γραμμή 2	4	3	5	7	9	12		
Γραμμή 3	0	1	2	5	14	6		
Γραμμή 4	8	14	6	9	10			
Γραμμή 5	1	2	5	7	9	13		
Γραμμή 6	0	1	3	11				

Το τελικό δίκτυο που προκύπτει μετά την βελτιστοποίηση είναι:

Πίνακας 5.22 – Τελικό Δίκτυο για $battery_{cap} = 60 \text{ kWh}$								
Γραμμή 1	0	1	2	5	7	9	10	12
Γραμμή 2	4	3	5	7	9	12		
Γραμμή 3	11	3	1	2	5	14	6	
Γραμμή 4	8	14	6	9	10	11		
Γραμμή 5	4	1	2	5	7	9	13	
Γραμμή 6	1	2	5	14				



Σχήμα 5.7 – Αρχικό δίκτυο Mandl



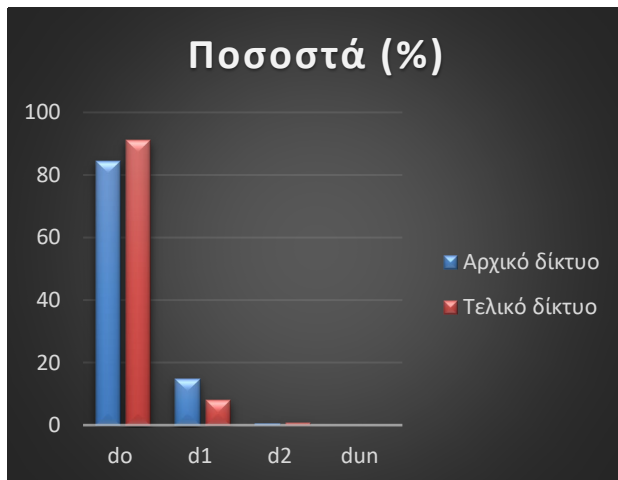
Σχήμα 5.8 – Τελικό Δίκτυο για $battery_{cap} = 60 \text{ kWh}$

Από την ανάλυση του δικτύου προκύπτει ότι στο τελικό δίκτυο χρειάζεται να μπου εννέα (9) φορτιστές για να εξυπηρετείται όλο το δίκτυο από ηλεκτρικά λεωφορεία. Συγκεκριμένα, φορτιστές χρειάζεται να μπου στους κόμβους:

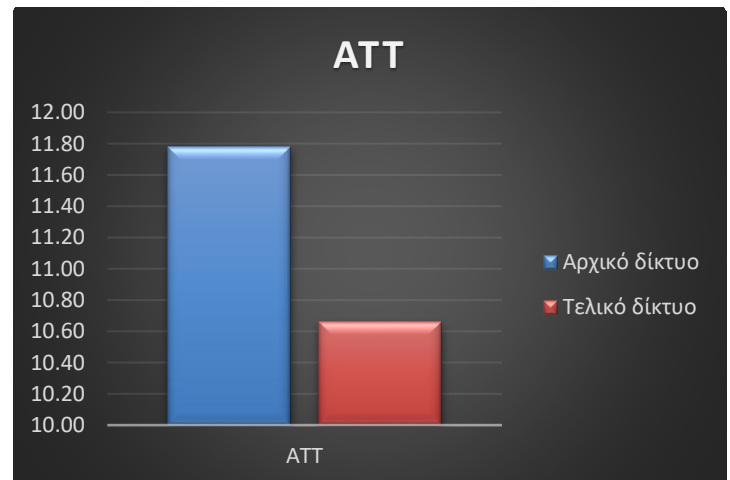
{0, 1, 4, 6, 8, 11, 12, 13, 14}

Πίνακας 5.23 - Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης με $battery_{cap} = 60 \text{ kWh}$		
Μέγεθος	Αρχικό δίκτυο	Τελικό δίκτυο
ΑΤΤ	11,78	10,66
d_0	84,52	91,27
d_1	14,90	8,03
d_2	0,58	0,71
d_{un}	0,00	0,00

Στην συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα για την εποπτική αποτύπωση των αποτελεσμάτων του των ποσοστών της εξυπηρετούμενης ζήτησης, των αντίστοιχων επιβατών καθώς και του μέσου χρόνου διαδρομής.



Διάγραμμα 5.7 – Ποσοστά επιβατών αρχικού – τελικού δικτύου ($battery_{cap} = 60$ kWh)



Διάγραμμα 5.8 – Μέσος χρόνος διαδρομής αρχικού – τελικού δικτύου ($battery_{cap} = 60$ kWh)

Έπειτα, γίνεται παρουσίαση των φορτίσεων ανά κόμβο σε κάθε γραμμή του τελικού δικτύου (Πίνακας 5.24) καθώς και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του (Πίνακας 5.25), με βάση την εξυπηρετούμενη ζήτηση.

Γρ. 1	0	1	2	5	7	9	10	12
	2640	1834	1624	1930	1896	1718	1020	
Γρ. 2	4	3	5	7	9	12		
	640	1416	1720	1714	604			
Γρ. 3	11	3	1	2	5	14	6	
	220	690	628	848	1096	956		
Γρ. 4	8	14	6	9	10	11		
	610	360	1328	1290	820			
Γρ. 5	4	1	2	5	7	9	13	
	320	464	554	1088	1106	582		
Γρ. 6	1	2	5	14				
	138	228	110					

	Κύκλος (min)	Συχνότητα (veh/h)	Αρ. οχημάτων (veh)	Τύπος οχήματος (N/A)	Μέγ. Μεταφορική ικανότητα (pas/h)
Γρ. 1	33	18	12	A	2700
Γρ. 2	28	12	13	A	1800
Γρ. 3	23	8	7	A	1200
Γρ. 4	32	9	11	A	1350

Γρ. 5	29	8	9	A	1200
Γρ. 6	8	3	1	N	240

Τέλος, παρουσιάζεται το συνολικό κόστος κάθε γραμμής για την απόκτηση λεωφορείων και μπαταριών καθώς και το συνολικό κόστος των φορτιστών (Πίνακας 5.26).

Πίνακας 5.26 – Κόστος Τελικού Δικτύου ($\text{battery}_{\text{cap}} = 60 \text{ kWh}$)				
	Λεωφορείο	Ηλεκτρικό λεωφορείο	Μπαταρία	Φορτιστές
Γραμμή 1	0	7.700.000	1.056.000	540.000
Γραμμή 2	0	4.550.000	624.000	
Γραμμή 3	0	2.450.000	336.000	
Γραμμή 4	0	3.850.000	528.000	
Γραμμή 5	0	3.150.000	432.000	
Γραμμή 6	0	350.000	48.000	

5.3.4 Κατανάλωση ενέργειας (kWh/km)

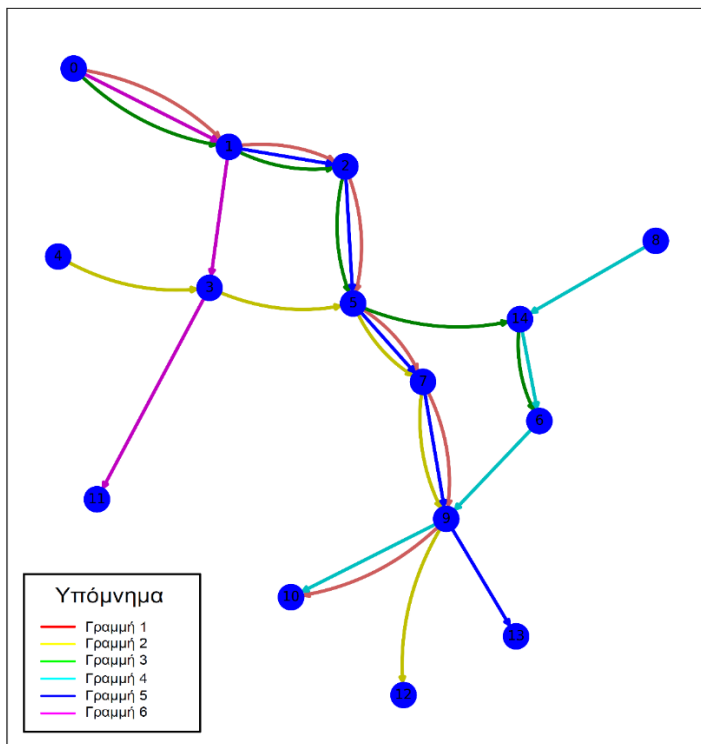
Τέλος, έγινε ανάλυση ευαισθησίας ως προς την κατανάλωση ενέργειας των ηλεκτρικών λεωφορείων τα αποτελέσματα για την βέλτιστη οικονομική λύση ήταν τα ίδια. Επομένως, θα γίνει παρουσίαση για $\text{energy}_{\text{cons}} = 2.0$.

Το αρχικό δίκτυο είναι:

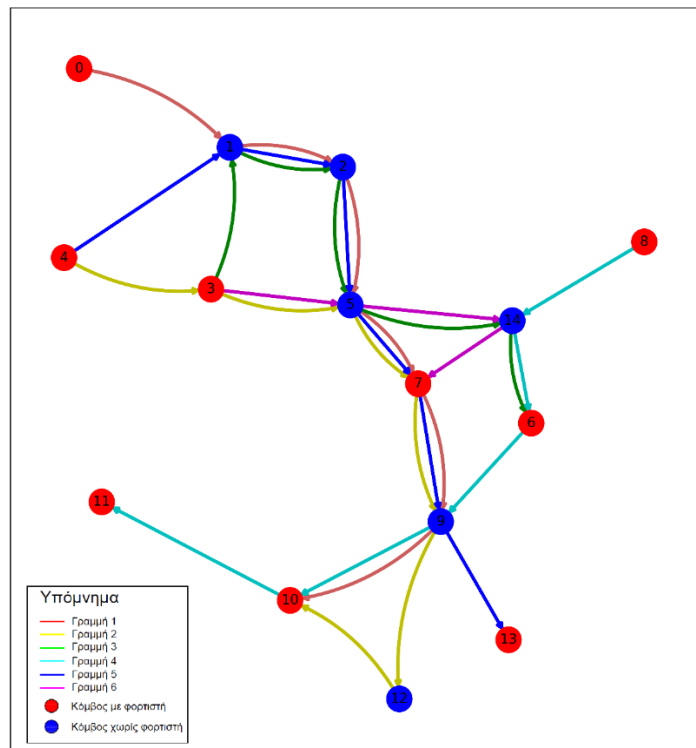
Πίνακας 5.27 – Αρχικό Δίκτυο Mandl								
Γραμμή 1	0	1	2	5	7	9	10	
Γραμμή 2	4	3	5	7	9	12		
Γραμμή 3	0	1	2	5	14	6		
Γραμμή 4	8	14	6	9	10			
Γραμμή 5	1	2	5	7	9	13		
Γραμμή 6	0	1	3	11				

Το τελικό δίκτυο που προκύπτει μετά την βελτιστοποίηση είναι:

Πίνακας 5.28 – Τελικό Δίκτυο για $\text{energy}_{\text{cons}} = 2.0$								
Γραμμή 1	0	1	2	5	7	9	10	
Γραμμή 2	4	3	5	7	9	12	10	
Γραμμή 3	3	1	2	5	14	6		
Γραμμή 4	8	14	6	9	10	11		
Γραμμή 5	4	1	2	5	7	9	13	
Γραμμή 6	3	5	14	7				



Σχήμα 5.9 – Αρχικό Δίκτυο Mandl



Σχήμα 5.10 – Τελικό Δίκτυο για $energy_{cons} = 2.0$

Από την ανάλυση του δικτύου προκύπτει ότι στο τελικό δίκτυο χρειάζεται να μπου εννέα (9) φορτιστές για να εξυπηρετείται όλο το δίκτυο από ηλεκτρικά λεωφορεία. Συγκεκριμένα, φορτιστές χρειάζεται να μπου στους κόμβους:

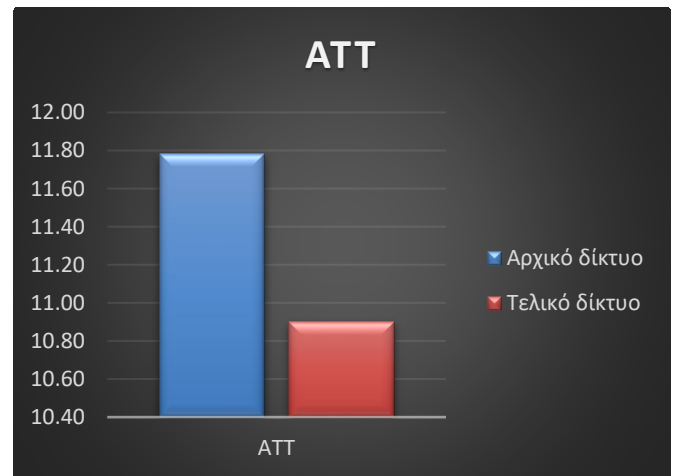
{ 0, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 13 }

Πίνακας 5.29 - Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης με $energy_{cons} = 2.0$		
Μέγεθος	Αρχικό δίκτυο	Τελικό δίκτυο
ATT	11,78	10,9
d_0	84,52	89,79
d_1	14,90	9,7
d_2	0,58	0,51
d_{un}	0,00	0,00

Στην συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα για την εποπτική αποτύπωση των αποτελεσμάτων του των ποσοστών της εξυπηρετούμενης ζήτησης, των αντίστοιχων επιβατών καθώς και του μέσου χρόνου διαδρομής.



Διάγραμμα 5.9 – Ποσοστά επιβατών αρχικού – τελικού δικτύου ($energy_{cons} = 2.0$)



Διάγραμμα 5.10 – Μέσος χρόνος διαδρομής αρχικού – τελικού δικτύου ($energy_{cons} = 2.0$)

Έπειτα, γίνεται παρουσίαση των φορτίσεων ανά κόμβο σε κάθε γραμμή του τελικού δικτύου (Πίνακας 5.30) καθώς και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του (Πίνακας 5.31), με βάση την εξυπηρετούμενη ζήτηση.

Γρ. 1	0	1	2	5	7	9	10
	2628	1916	1734	1922	1902	1104	
Γρ. 2	4	3	5	7	9	12	10
	638	1352	1778	1874	1256	360	
Γρ. 3	3	1	2	5	14	6	
	540	608	892	998	910		
Γρ. 4	8	14	6	9	10	11	
	614	410	1330	1448	1024		
Γρ. 5	4	1	2	5	7	9	13
	320	514	638	1076	1134	586	
Γρ. 6	3	5	14	7			
	154	86	130				

	Κύκλος (min)	Συχνότητα (veh/h)	Αρ. οχημάτων (veh)	Τύπος οχήματος (N/A)	Μέγ. Μεταφορική ικανότητα (pas/h)
Γρ. 1	28	18	19	A	2700
Γρ. 2	33	13	16	A	1950
Γρ. 3	13	7	4	A	1050
Γρ. 4	32	10	12	A	1500

Γρ. 5	29	8	9	A	1200
Γρ. 6	9	2	1	N	160

Τέλος, παρουσιάζεται το συνολικό κόστος κάθε γραμμής για την απόκτηση λεωφορείων και μπαταριών καθώς και το συνολικό κόστος των φορτιστών (Πίνακας 5.32).

Πίνακας 5.32 – Κόστος Τελικού Δικτύου ($energy_{cons} = 2.0$)				
	Λεωφορείο	Ηλεκτρικό λεωφορείο	Μπαταρία	Φορτιστές
Γραμμή 1	0	6.650.000	1.368.000	540.000
Γραμμή 2	0	5.600.000	1.152.000	
Γραμμή 3	0	1.400.000	288.000	
Γραμμή 4	0	4.200.000	864.000	
Γραμμή 5	0	3.150.000	648.000	
Γραμμή 6	0	350.000	72.000	

5.4 Επίλυση δικτύου Mumford0 - 9 διαδρομών

Για την επίλυση του δικτύου πρέπει να οριστούν κάποιες παράμετροι, οι οποίες δίνονται στο πρόγραμμα εκ των προτέρων. Πρόκειται για παραμέτρους που διαμορφώνουν την αρχική μορφή του δικτύου, καθώς και κάποιες παραμέτρους σχετικά με τον γενετικό αλγόριθμο.

Οι αρχικές παράμετροι του προβλήματος είναι:

Πίνακας 5.33 - Παράμετροι Προβλήματος		
Παράμετρος	Συμβολισμός	Τιμή
Αριθμός γραμμών	N	9
Ελάχιστοι κόμβοι διαδρομής	S_{min}	4
Μέγιστοι κόμβοι διαδρομής	S_{max}	15
Ποινή μετεπιβίβασης (min)	$penalty_{transf}$	5

Οι παράμετροι του γενετικού αλγορίθμου είναι:

Πίνακας 5.34 – Παράμετροι Γενετικού Αλγορίθμου		
Παράμετρος	Συμβολισμός	Τιμή
Μέγεθος πληθυσμού	popN	25
Μέγεθος elite	eliteN	8
Αριθμός επαναλήψεων	iterN	150
Συντελεστής διασταύρωσης	$p_{swap} = \frac{1}{lineN}$	0,11
Συντελεστής μικρής τροποποίησης	p_{ms}	0,9
Συντελεστής διαγραφής κόμβου	p_{del}	0,4
Ταχύτητα λεωφορείου	V (km/h)	15

Χωρητικότητα μπαταρίας	battery _{cap} (kWh)	90
Κατανάλωση ενέργειας	energy _{cons} (kWh/km)	1,5
Μέγιστη απόσταση που μπορεί να διανύσει το λεωφορείο	$\max_d = \frac{0.7 * \text{battery_cap}}{\text{energy_cons}}$ (km)	42
Ποσοστό συμμετοχής κόστους επιβατών	penalty1	0,8
Ποσοστό συμμετοχής κόστους ηλεκτρικού δικτύου	Penalty2	0,5
Κόστος σταθμών φόρτισης	cost _{charging_stations} (€)	60000

5.4.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

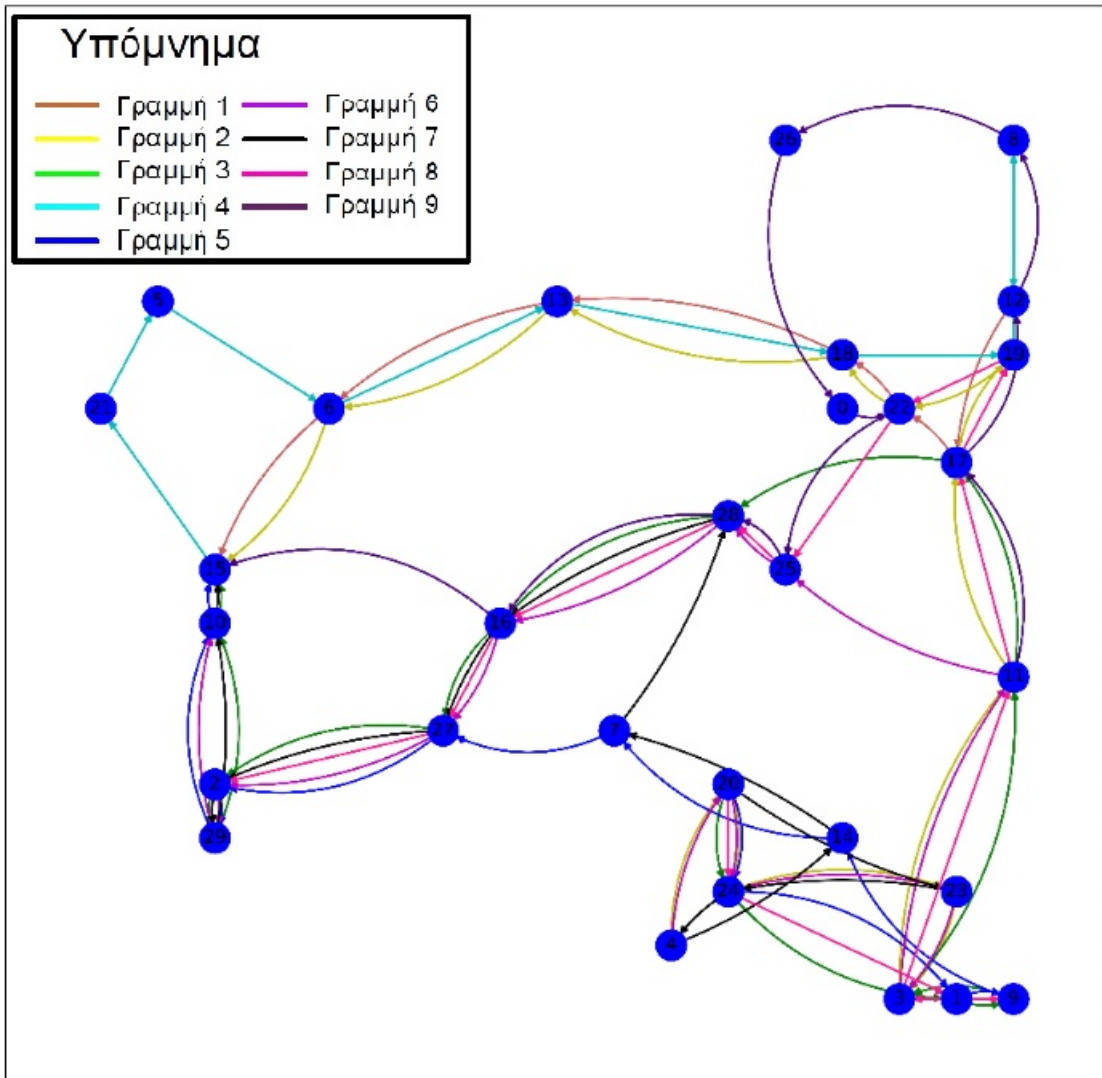
Τα αποτελέσματα από την ανάλυση δικτύου με εννέα (9) διαδρομές, αφορούν την αξιολόγηση του αρχικού δικτύου όσο και του τελικού για το σύνολο των επιβατών, και παρουσιάζονται παρακάτω.

Το αρχικό δίκτυο είναι:

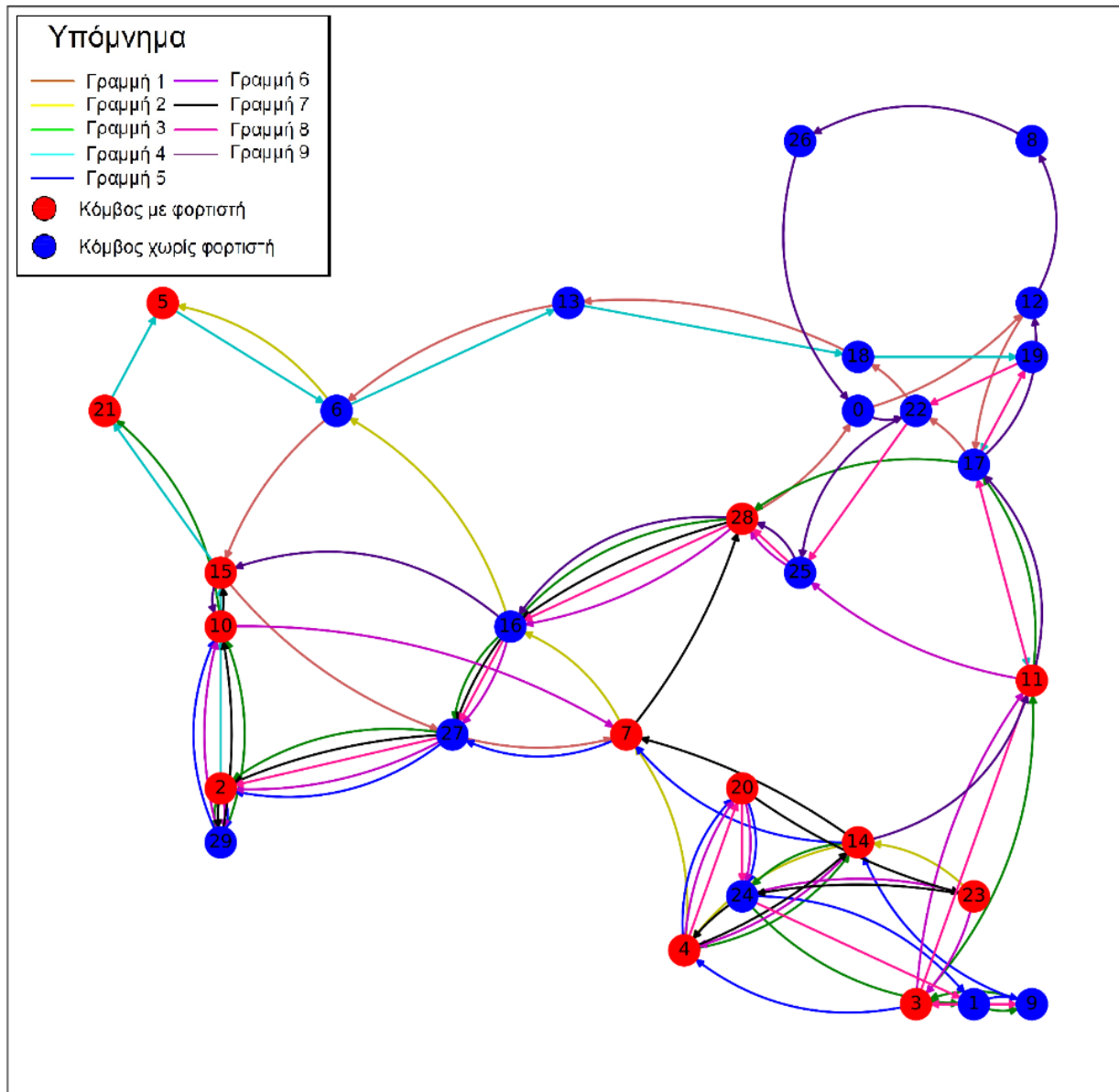
Γραμμή	12	17	22	18	13	6	15	2	21	5					
Γραμμή 1	12	17	22	18	13	6	15	2	21	5					
Γραμμή 2	4	20	24	23	3	11	17	28	16	27	2	29	10		
Γραμμή 3	24	1	9	3	11	17	28	16	27	2	29	10			
Γραμμή 4	10	15	21	5	6	13	18	19							
Γραμμή 5	20	24	1	9	14	7	27	2	29	10	15				
Γραμμή 6	14	4	20	24	23	3	11	25	28	16	27	2	29	10	
Γραμμή 7	20	23	24	4	14	7	28	16	27	2	29	10	15		
Γραμμή 8	4	20	24	1	9	3	11	17	19	22	25	28	16	27	2
Γραμμή 9	14	11	17	12	8	26	0	22	25	28	16	5	10		

Το τελικό δίκτυο που προκύπτει μετά την βελτιστοποίηση είναι:

Γραμμή	28	0	12	17	22	18	13	6	15	27	7				
Γραμμή 1	28	0	12	17	22	18	13	6	15	27	7				
Γραμμή 2	23	14	4	7	16	6	5								
Γραμμή 3	4	14	24	1	9	3	11	17	28	16	27	2	29	10	21
Γραμμή 4	2	10	15	21	5	6	13	18	19	17	11				
Γραμμή 5	3	4	20	24	1	9	14	7	27	2	29	10			
Γραμμή 6	14	4	20	24	23	3	11	25	28	16	27	2	29	10	7
Γραμμή 7	20	23	24	4	14	7	28	16	27	2	29	10	15		
Γραμμή 8	4	20	24	1	9	3	11	17	19	22	25	28	16	27	2
Γραμμή 9	14	11	17	12	8	26	0	22	25	28	16	5	10		



Σχήμα 5.11 – Αρχικό Δίκτυο Mumford0



Σχήμα 5.12 – Τελικό Δίκτυο Mumford0

Από την ανάλυση του δικτύου προκύπτει ότι στο τελικό δίκτυο χρειάζεται να μπουν δεκατρείς (13) φορτιστές για να εξυπηρετείται όλο το δίκτυο από ηλεκτρικά λεωφορεία. Συγκεκριμένα, φορτιστές χρειάζεται να μπουν στους κόμβους:

{ 2, 3, 4, 5, 7, 10, 11, 14, 15, 20, 21, 23, 28}

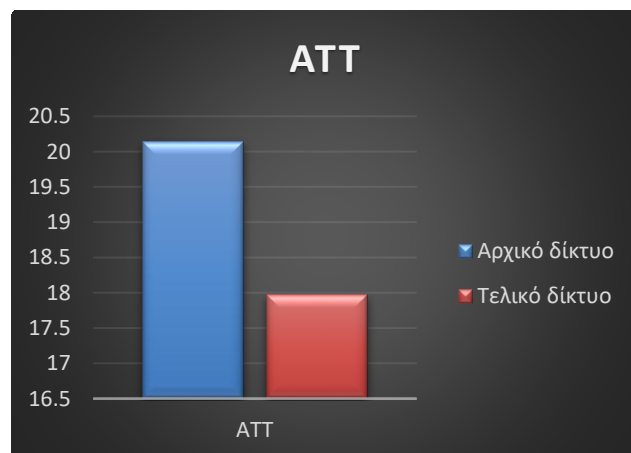
Πίνακας 5.37 – Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης		
Μέγεθος	Αρχικό δίκτυο	Τελικό δίκτυο
ΑΤΤ	20,14	17,97
d ₀	54,79	51,92

d_1	40,01	44,58
d_2	5,20	3,51
d_{un}	0,00	0,00

Στην συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα για την εποπτική αποτύπωση των αποτελεσμάτων του των ποσοστών της εξυπηρετούμενης ζήτησης, των αντίστοιχων επιβατών καθώς και του μέσου χρόνου διαδρομής.



Διάγραμμα 5.11 – Ποσοστά επιβατών αρχικού – τελικού δικτύου Mumford0



Διάγραμμα 5.12 – Μέσος χρόνος διαδρομής αρχικού – τελικού δικτύου Mumford0

Έπειτα, γίνεται παρουσίαση των φορτίσεων ανά κόμβο σε κάθε γραμμή του τελικού δικτύου (Πίνακας 5.38) καθώς και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του (Πίνακας 5.39), με βάση την εξυπηρετούμενη ζήτηση.

Πίνακας 5.38 – Φορτίσεις Τελικού Δικτύου Mumford0															
Γρ.1	28	0	12	17	22	18	13	6	15	27	7				
		13266	9768	12350	26590	35886	23610	19680	14876	9900	5548				
Γρ.2	23	14	4	7	16	6	5								
		15640	10826	32678	32026	32380	17668								
Γρ.3	4	14	24	1	9	3	11	17	28	16	27	2	29	10	21
		976	9530	460	4582	10638	10468	8354	12594	9912	8924	7128	4608	2441	5104
Γρ.4	2	10	15	21	5	6	13	18	19	17	11				
		5452	6140	10268	14956	18230	19410	16392	16938	13362	9230				
Γρ.5	3	4	20	24	1	9	14	7	27	2	29	10			
		8826	4358	1612	1792	7774	19346	30150	21584	15892	7874	561			
Γρ.6	14	4	20	24	23	3	11	25	28	16	27	2	29	10	7
		4302	5480	1990	3910	11474	11504	15546	11280	8844	7078	5708	3682	561	8010
Γρ.7	20	23	24	4	14	7	28	16	27	2	29	10	15		
		1160	1130	8266	6380	8858	14596	2388	2958	2728	1866	3211	3568		
Γρ.8	4	20	24	1	9	3	11	17	19	22	25	28	16	27	2
		2878	5462	5842	10172	19158	21128	19980	13422	14076	15500	13646	10112	6842	3704
Γρ.9	14	11	17	12	8	26	0	22	25	28	16	5	10		
		24344	25600	26794	21052	10114	18338	27592	25232	22814	23240	19222	8160		

Πίνακας 5.39 – Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Τελικού Δικτύου Mumford0					
	Κύκλος (min)	Συχνότητα (veh/h)	Αρ. οχημάτων (veh)	Τύπος οχήματος (N/A)	Μέγ. Μεταφορική ικανότητα (pas/h)
Γρ. 1	43	13	21	A	1950
Γρ. 2	28	12	13	A	1800
Γρ. 3	59	9	20	N	720
Γρ. 4	42	7	11	A	1050
Γρ. 5	46	11	19	A	1650
Γρ. 6	62	11	26	N	880
Γρ. 7	49	10	18	N	800
Γρ. 8	54	8	16	A	1200
Γρ. 9	50	10	19	A	1500

Τέλος, παρουσιάζεται το συνολικό κόστος κάθε γραμμής για την απόκτηση λεωφορείων και μπαταριών καθώς και το συνολικό κόστος των φορτιστών (Πίνακας 5.40).

Πίνακας 5.40 – Κόστος Τελικού Δικτύου Mumford0				
	Λεωφορείο	Ηλεκτρικό λεωφορείο	Μπαταρία	Φορτιστές
Γραμμή 1	0	7.350.000	1.512.000	780.000
Γραμμή 2	0	4.550.000	936.000	
Γραμμή 3	0	7.000.000	1.440.000	
Γραμμή 4	0	3.850.000	792.000	
Γραμμή 5	0	6.650.000	1.368.000	
Γραμμή 6	0	9.100.000	1.872.000	
Γραμμή 7	0	6.300.000	1.296.000	
Γραμμή 8	0	5.600.000	1.152.000	
Γραμμή 9	0	6.650.000	1.368.000	

5.5 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

5.5.1 Δίκτυο Mandl

Η επίλυση έγινε για ένα δίκτυο έξι (6) διαδρομών. Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε προέκυψε ένα νέο δίκτυο με μικρές διαφορές στους κόμβους των αντίστοιχων διαδρομών. Επίσης, από την βελτιστοποίηση το καινούργιο δίκτυο που βρέθηκε είχε λιγότερο μέσο χρόνο διαδρομής των επιβατών σε σχέση με το αρχικό καθώς και μεγαλύτερο ποσοστό επιβατών που εξυπηρετούνται χωρίς μετεπιβιβάσεις. Επομένως, είναι ένα σαφώς καλύτερο δίκτυο συγκριτικά με το αρχικό.

Τέλος, από την ανάλυση του κόστους του δικτύου παρατηρήθηκε ότι είναι εφικτό όλες οι διαδρομές να αντικαθιστούν από ηλεκτρικά λεωφορεία καθώς οι αποστάσεις είναι μικρότερες από την μέγιστη απόσταση που μπορεί να διανύσει ένα λεωφορείο με μία μόνο φόρτιση (είτε στην αφετηρία είτε στο τέρμα).

Με την ανάλυση ευαισθησίας μπορούν να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα ως προς το πως επηρεάζουν οι παράμετροι τον τρόπο εύρεσης βέλτιστης λύσης για το πρόβλημα.

Η αλλαγή της ενέργειας κατανάλωσης του λεωφορείου είναι η μοναδική παράμετρος η οποία δεν επηρέασε την λύση του προβλήματος. Αυτό συνέβει διότι το δίκτυο αποτελείται από διαδρομές μικρών αποστάσεων αφετηρίας – τέρματος επομένως η μπαταρία επαρκεί για τουλάχιστον μία διαδρομή ανεξάρτητα από την κατανάλωση ενέργεια που μπορεί να έχει το λεωφορείο.

Το ποσοστό κόστους ηλεκτρικού δικτύου όσο αυξάνεται τόσο μεγαλώνει και το συνολικό κόστος για την υλοποίηση του δικτύου ως ηλεκτρικό. Αυτό συμβαίνει γιατί το κόστος για την υλοποίηση ηλεκτρικού δικτύου είναι αρκετά μεγάλο, επομένως όσο μεγαλύτερο ποσοστό λαμβάνεται υπόψη στην βελτιστοποίηση τόσο μεγαλώνει και το συνολικό κόστος. Παρότι, το κόστος αυξάνεται αρκετά σε όλες τις δοκιμές προέκυψαν δίκτυα βελτιωμένα συγκριτικά με τα αρχικά, όσον αφορά τον μέσο χρόνο διαδρομής των επιβατών αλλά και το ποσοστό των επιβατών που εξυπηρετούνται χωρίς μετεπιβιβάσεις. Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και με το μέγεθος της μπαταρίας. Όσο μεγαλώνει η χωρητικότητα της μπαταρίας αυξάνεται το κόστος, αλλά ταυτόχρονα αυτό εξαρτάται και από το πλήθος του στόλου των λεωφορείων.

Παρόμοια επηρεάζει και το κόστος των σταθμών φόρτισης στην εύρεση της καλύτερης λύσης. Σχεδόν σε όλες τις δοκιμές όσο αυξανόταν το κόστος των φορτιστών αυξανόταν και το κόστος της συνολικής λύσης, με μία μόνο εξαίρεση. Αν και το κόστος των σταθμών φόρτισης επηρεάζουν το αποτέλεσμα της τελικής λύσης, το ποσοστό συμμετοχής τους στο κόστος υλοποίησης ηλεκτρικής γραμμής δεν είναι τόσο μεγάλο σε σχέση με την χωρητικότητα της

μπαταρίας και το πλήθος του στόλου που θα χρειαστεί για την υλοποίηση της αντίστοιχης λύσης.

Σε μεγάλο ποσοστό τα αποτελέσματα από τις διάφορες δοκιμές έδωσαν καλύτερα δίκτυα ως προς τον μέσο χρόνο διαδρομής των επιβατών και το ποσοστό των επιβατών που εξυπηρετούνται, αν και το κόστος υλοποίησης μπορεί να αυξανόταν. Ωστόσο, ο γενετικός αλγόριθμος κάνει τυχαίο συνδυασμό μεταβλητών, τροποποιήσεων και διασταυρώσεων επομένως μπορεί να υπάρχει ένας άλλος συνδυασμός που να βγάζει καλύτερα αποτελέσματα. Θα μπορούσαν να γίνουν περισσότερες δοκιμές για να ήταν δυνατή, με περισσότερη ακρίβεια, η επιρροή των παραμέτρων στον αλγόριθμο επίλυσης. Ωστόσο, κάτι τέτοιο θα απαιτούσε πολύ χρόνο κάτι που δεν είναι δυνατόν για την συγκεκριμένη εργασία.

5.5.2 Δίκτυο Mumford0

Εκτός του βασικού δικτύου Mandl έγινε και μία προσπάθεια εφαρμογής του προγράμματος σε ένα μεγαλύτερο δίκτυο, εκείνο του Mumford0. Για τεχνικούς λόγους ο γενετικός αλγόριθμος έγινε με πενήντα (50) επαναλήψεις αντί των εκατόν πενήντα (150) που έγιναν στο βασικό δίκτυο. Αυτό συνέβη λόγω του πολύ μεγάλου χρόνου εκτέλεσης της κάθε επανάληψης. Ωστόσο, αν και τα αποτελέσματα δεν μπορούν να ληφθούν ως πλήρως αληθινά αποτελούν όμως ένδειξη του αποτελέσματος.

Έτσι, από την επίλυση του προγράμματος προέκυψε ένα καινούργιο δίκτυο αρκετά παρόμοιο με το αρχικό, με λίγες τροποποιήσεις σε κάποιες γραμμές του αρχικού δικτύου. Παρατηρήθηκε ότι ο μέσος χρόνος διαδρομής του μειώθηκε από την διαδικασία της βελτιστοποίησης, αν και το ποσοστό των επιβατών που εξυπηρετούνται απευθείας μειώθηκε. Βέβαια, μειώθηκε και το ποσοστό των επιβατών που εξυπηρετούνται με δύο (2) μετεπιβιβάσεις κι έτσι αυξήθηκε ο αριθμός των επιβατών με μία (1) μετεπιβίβαση. Αν και αρχικά φαίνεται ότι το νέο δίκτυο δεν είναι καλύτερο από το πρώτο, οι επιβάτες έχουν λιγότερο χρόνο διαδρομής κάτι που συνήθως επιζητούν οι μετακινούμενοι περισσότερο.

Επίσης, αν και σαφώς μεγαλύτερο δίκτυο το μέγεθος της μπαταρίας που επιλέχθηκε είναι ικανό προκειμένου όλες οι γραμμές του νέου δικτύου να εξυπηρετούνται από ηλεκτρικά λεωφορεία. Όπως, προκύπτει από την ανάλυση το μήκος των καινούργιων γραμμών είναι μικρότερο από την μέγιστη απόσταση που μπορεί να διανύσει ένα ηλεκτρικό λεωφορείο με μία (1) μόνο φόρτιση (είτε στην αφετηρία είτε στο τέρμα της διαδρομής).

Στο συγκεκριμένο δίκτυο, δεν έγινε ανάλυση ευαισθησίας λόγω του μεγάλου χρόνου εκτέλεσης του γενετικού αλγορίθμου.

6 Επίλογος

6.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσίασε το πρόβλημα του επανασχεδιασμού ενός υπάρχοντος δικτύου και της αλλαγής του με ένα νέο ηλεκτρικό, όπου αυτό είναι εφικτό. Πρόκειται για τον επανασχεδιασμό ενός δικτύου πιο φιλικού προς το περιβάλλον και πιο οικονομικού στην λειτουργία του, γιατί ένα τέτοιο δίκτυο, αν και χρειάζονται μεγαλύτερα χρειάζεται μεγαλύτερο κεφάλαιο για την απόκτησή του, έχει μικρότερο κόστος συντήρησης από ένα τυπικό δίκτυο με πετρελαιοκίνητα λεωφορεία.

Αρχικά, έγινε μια εισαγωγή στα ηλεκτρικά λεωφορεία καθώς και οι κατηγορίες στις οποίες διαχωρίζονται. Έγινε ανάλυση των τρόπων φόρτισης με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία, ακόμη και τους διαφορετικούς διαχωρισμούς που έκαναν οι εκάστοτε ερευνητές. Με βάση τις αναλύσεις και τις έρευνες που έγιναν από διάφορους μελετητές, γίνεται η παρουσίαση των μεγεθών μπαταρίας καθώς και η κατανάλωση ενέργειας που βρέθηκε. Στη συνέχεια, γίνεται αναλυτική περιγραφή της μεθόδου του επανασχεδιασμού με όλες τις παραμέτρους και τους περιορισμούς που ισχύουν.

Όλα τα πειράματα έγιναν για την Περιοχή Μελέτης I, αν και υπήρξε μια προσπάθεια για επέκταση του προγράμματος σε μεγαλύτερο δίκτυο όπως αυτό της Περιοχής Μελέτης II, όπου για τεχνικούς λόγους τελικά δεν έγιναν πειράματα ευαισθησίας.

Εκτός από τα δεδομένα του δικτύου που εισήχθησαν χρειάστηκε να ληφθούν κάποιες υποθέσεις ως προς τις μεταβλητές καθώς και κάποιους συντελεστές. Παράδειγμα αποτελούν, το ποσοστό συμμετοχής του κόστους των χρηστών και του χειριστή στην αντικειμενική συνάρτηση. Εκεί έγινε η θεώρηση πως περισσότερο σημαντική είναι η ικανοποίηση των χρηστών από το καινούργιο δίκτυο παρά το κόστος για την υλοποίηση του σχεδίου.

Για την επίλυση του δικτύου έγιναν κάποιες απλοποιήσεις, αν κι από τα αποτελέσματα είναι δυνατόν να παρατηρήσει κανείς ότι σχεδόν σε κάθε περίπτωση το καινούργιο δίκτυο που δημιουργείται είναι σαφώς καλύτερο από το αρχικό και πάντα είναι δυνατόν να αντικατασταθεί με ένα καινούργιο ηλεκτρικό δίκτυο. Επομένως, είναι δυνατόν να πούμε ότι τα αποτελέσματα του αλγορίθμου ικανοποιούν τα ζητούμενα με λογικά αποτελέσματα.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η αντικειμενική συνάρτηση διαμορφώθηκε έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος επένδυσης για την υλοποίηση ηλεκτρικού δικτύου. Στην επίλυση του προβλήματος θα μπορούσαν να ληφθούν υπόψη κι άλλες μεταβλητές, όπως είναι οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν αλλά και ο ρυθμός κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας των λεωφορείων, γιατί σε κάποιες περιπτώσεις θα χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί κλιματισμός και σε άλλες θέρμανση.

Επίσης, στην επίλυση δεν υπάρχει κάποιο ανώτατο όριο κόστους, οποιαδήποτε λύση ανεξάρτητα από το κόστος υλοποίησής της γινόταν δεκτή. Η αντικειμενική συνάρτηση θα μπορούσε να έχει κάποιο ανώτατο όριο ως προς το κόστος κατασκευής ηλεκτρικών γραμμών κι όταν σε κάποια λύση το αποτέλεσμα της αντικειμενικής συνάρτησης το ξεπερνούσε θα απέρριπτε την λύση. Επομένως, η συγκεκριμένη γραμμή δεν θα εξυπηρετούνταν από ηλεκτρικά λεωφορεία αλλά από πετρελαιοκίνητα.

Ακόμη, ως ηλεκτρικές γραμμές εξετάστηκαν μόνο εκείνες που η απόστασή τους είναι μικρότερη από τη μέγιστη απόσταση που μπορεί να διανύσει ένα λεωφορείο με την μπαταρία που έχει. Θα ήταν δυνατόν να ληφθούν υπόψη και οι υπόλοιπες γραμμές, βάζοντας φορτιστές σε κάποιο σημείο ενδιάμεσα, ανάλογα με τους πόσοι είναι απαραίτητοι για τη σωστή λειτουργία του συστήματος.

Μια ακόμη πρόταση είναι στον υπολογισμό του κόστους αγοράς των πετρελαιοκίνητων λεωφορείων, να συμπεριληφθεί κι ο ήδη υπάρχων στόλος, ώστε να μην γίνει υπερκοστολόγηση του έργου.

Για την επίλυση του υπάρχοντος προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν μόνο φορτιστές ως μέθοδος φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων. Θα ήταν δυνατόν να χρησιμοποιηθούν αποκλειστικά λωρίδες φόρτισης ή ακόμη και συνδυασμός των δύο μεθόδων.

Μια άλλη πρόταση είναι στις παραμέτρους του προβλήματος να προστεθεί κι η διαμόρφωση των στάσεων καθώς επίσης κι ο τρόπος εισόδου – εξόδου από τα λεωφορεία. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο χρόνος διαδρομής να μην είναι σταθερός και να διαφέρει από στάση σε στάση.

7 Βιβλιογραφία

- Bi, Z., Kan, T., Mi, C. C., Zhang, Y., Zhao, Z., Keoleian, G. A., (2016) A review of wireless power transfer for electric vehicles: Prospects to enhance sustainable mobility.
- Fan, W., Machemehl, R. B., (2011) Bi-Level Optimization Model for Public Transportation Network Redesign Problem Accounting for Equity Issues.
- Fusco, G., Alessandrini, A., Colombaroni, C., Valentini, M. P., (2012) A model for transit design with choice of electric charging system.
- Gao, Z., Lin, Z., LaClair, T. J., Liu, C., Li, J. M., Birky, A. K., Ward, J., (2017) Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service.
- Griva, I., Nash, S. G., Sofer, A., (2009) Linear and Nonlinear Optimization.
- Hall, C. H., Ceder, A., Ekstrom, J., Quttineh, N. H. (2018). Adjustments of public transit operations planning process for the use of electric buses.
- Hwang, I., Student Member, IEEE, Jang, Y. J., Member, IEEE, Ko, Y. D., Member, IEEE, and Lee, M. S., Student Member, IEEE. (2018). System Optimization for Dynamic Wireless Charging Electric Vehicles Operating in a Multiple-Route Environment
- Iliopoulou, C., Kepaptsoglou, K. (2019). Integrated transit route network design and infrastructure planning for on-line electric vehicles.
- Iliopoulou, C., Tassopoulos, I., Kepaptsoglou, K., Beligiannis, G. (2019). Electric Transit Route Network Design Problem: Model and Application.
- Jang, Y. J., Jeong, S. and Lee, M. S. (2016). Initial Energy Logistics Cost Analysis for Stationary, Quasi-Dynamic, and Dynamic Wireless Charging Public Transportation Systems.
- Kaminka, G. A., Fox, M., Bouquet, P., Hullermeier, E., Dignum, V., Dignum, F., Harmelen, F. (2016). 22ND European Conference on Artificial Intelligence, ECAI.
- Kepaptsoglou, K. (2020). Electric Public Transportation Network Design: Research Plan and Literature Review
- Kunitz, A., Goehlich, D., Mendeleevitch, R. (2014). Planning and Optimization of a Fast-charging Infrastructure for Electric Urban Bus Systems.
- Kunitz, A., Mendeleevitch, R., Goehlich, D. (2017). Electrification of a city bus network—An optimization model for cost-effective placing of charging infrastructure and battery sizing of fastcharging electric bus systems,
- Laizāns, A., Graurasc, I., Rubenis, A., Utehinc, G. (2015) Economic Viability of Electric Public Buses: Regional Perspective.
- Lajunen, A. (2017). Lifecycle costs and charging requirements of electric buses with different charging methods.

- Mahmoud, M., Garnett, R., Ferguson, M., Kanaroglou, P. (2016) Electric buses: A review of alternative powertrains.
- Mumford, C. L., School of Computer Science & Informatics, Cardiff University. (2016). Supplementary Material for: New Heuristic and Evolutionary Operators for the Multi-Objective Urban Transit Routing Problem, CEC 2013.
- Pternea, M., Kepaptsoglou, K., Karlaftis, M. G. (2015). Sustainable urban transit network design.
- Rogge, M., Hurkc, E., Larsenc, A., Sauer, D. U. (2017) Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure.
- Sun, L., Ma, D., Tang, H. (2018). A review of recent trends in wireless power transfer technology and its applications in electric vehicle wireless charging
- Wang, X., Yuen, C., Hassan, N. U., An, N. and Wu, W. (2016). Electric Vehicle Charging Station Placement for Urban Public Bus Systems.
- Wang, Y., Bi, J., Guan, W., Zhao, X. (2017) Optimising route choices for the travelling and charging of battery electric vehicles by considering multiple objectives.
- Wang, Y., Huang, Y., Xu, J., Barclay, N. (20177). Optimal recharging scheduling for urban electric buses: A case study in Davis.
- Zhou, B., Wu, Y., Zhou, B., Wang, R., Ke, W., Zhang, S., Hao J. (2016). Real-world performance of battery electric buses and their life-cycle benefits with respect to energy consumption and carbon dioxide emissions
- Αγγελιδάκης Ν. Α., Εκπαιδευτικός Πληροφορικής. (2015). Εισαγωγή στον προγραμματισμό με την Python.
 - (http://aggelid.mysch.gr/pythonbook/INTRODUCTION_TO_COMPUTER_PROGRAMMING_WITH_PYTHON.pdf)
- Γεωργόπουλος Ε. Φ., Λυκοθανάσης Σ. Δ. (1999) *Εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγορίθμους*.
- Καρλαύτης Μ. Γ., Λαγαρός Ν.Δ. (2010). *Επιχειρησιακή έρευνα και βελτιστοποίηση για μηχανικούς*.
- Καρλαύτης Μ. Γ., Λυμπέρης Κ.Π. (2009). *Σύστημα Αστικών Συγκοινωνιών – Σχεδιασμός, Κατασκευή, Λειτουργία*.
- Λεβεντεας Δ. (2009). *Οδηγός Python Μέσω Παραδειγμάτων*.
- https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%93%CE%B5%CE%BD%CE%B5%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CE%AF_%CE%91%CE%BB%CE%B3%CF%8C%CF%81%CE%B9%CE%B8%CE%BC%CE%BF%CE%B9
- (*)https://www.researchgate.net/figure/Single-point-crossover-it-means-that-during-the-crossover-operation-there-is-only-one_fig1_257431870

- (**)[https://figshare.com/articles/Using the Genetic Algorithm for the Optimization of Dynamic School Bus Routing Problem-Figure 6 Mutation process/6274883/1](https://figshare.com/articles/Using_the_Genetic_Algorithm_for_the_Optimization_of_Dynamic_School_Bus_Routing_Problem-Figure_6_Mutation_process/6274883/1)

8 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΑΡΧΕΙΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

- Βασικό σενάριο

=====
=====

Main Data:

6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer, 0.25 (km/min) bus speed , 90 (kWh) battery capacity, 1.5 (kWh/km) energy consumption, 41.99999999999999 (km) maximum distance, 60000 cost of charging stations

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: [1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

All users' score:

d0: 84.52%, d1: 14.9%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.78 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1194, 1528, 1604, 1998, 1932, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2422, 2448, 1610]
Line 3: [842, 1002, 1110, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [420, 666, 1098, 1110, 584]
Line 6: [596, 906, 1038]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
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): 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: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Genetic algorithm data:

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

Objective function: $\min Z = \text{penalty1} * (8 * \text{score0}[\text{ATT}] * \text{dtotal} + 80 * \text{score0}[\text{dun}] * \text{dtotal}) + \text{penalty2} * \text{total_cost}$
Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel
(Delete/Add node rate): 0.4, Penalty1 (% passenger cost): 0.8, Penalty2 (% electric bus cost): 0.5

Final Route Set:

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

All users' score:

d0: 89.79%, d1: 9.7%, d2: 0.51%, dun: 0.0%, ATT: 10.9 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [2628, 1916, 1734, 1922, 1902, 1104]
Line 2: [638, 1352, 1778, 1874, 1256, 360]
Line 3: [540, 608, 892, 998, 910]
Line 4: [614, 410, 1330, 1448, 1024]
Line 5: [320, 514, 638, 1076, 1134, 586]
Line 6: [154, 86, 130]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 18, No. of vehicles: 19, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2700
Line 2: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 13, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1950
Line 3: Route duration (m): 13, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 4, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050
Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 12, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1500
Line 5: Route duration (m): 29, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 9, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 6: Route duration (m): 9, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 1, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

Final Cost per Line:

Line 1: Bus: 0, e-Bus: 6650000, Battery: 1368000
Line 2: Bus: 0, e-Bus: 5600000, Battery: 1152000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 1400000, Battery: 288000
Line 4: Bus: 0, e-Bus: 4200000, Battery: 864000
Line 5: Bus: 0, e-Bus: 3150000, Battery: 648000
Line 6: Bus: 0, e-Bus: 350000, Battery: 72000

Number of Charging Stations:9

Final Cost of Charging Stations:540000

Chargers List: {0, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 13}

- **Παράμετρος: Ποσοστό κόστους ηλεκτρικού δικτύου**

=====
=====

Main Data:

6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer, 0.25 (km/min) bus speed , 90 (kWh) battery capacity, 1.5 (kWh/km) energy consumption, 41.99999999999999 (km) maximum distance, 60000 cost of charging stations

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: [1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

All users' score:

d0: 84.52%, d1: 14.9%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.78 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1194, 1528, 1604, 1998, 1932, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2422, 2448, 1610]
Line 3: [842, 1002, 1110, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [420, 666, 1098, 1110, 584]
Line 6: [596, 906, 1038]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
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): 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: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Genetic algorithm data:

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

Objective function: $\min Z = \text{penalty1} * (8 * \text{score0}[\text{ATT}] * \text{dtotal} + 80 * \text{score0}[\text{dun}] * \text{dtotal}) + \text{penalty2} * \text{total_cost}$
Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel
(Delete/Add node rate): 0.4, Penalty1 (% passenger cost): 0.8, Penalty2 (% electric bus cost): 0.6

Final Route Set:

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

All users' score:

d0: 90.56%, d1: 8.93%, d2: 0.51%, dun: 0.0%, ATT: 10.65 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [2634, 1854, 1654, 1814, 1810, 1054]
Line 2: [640, 1224, 1624, 1776, 1256, 360]
Line 3: [220, 660, 664, 934, 1060, 910]
Line 4: [620, 410, 1330, 1286, 820]
Line 5: [320, 508, 626, 1042, 1114, 588]
Line 6: [160, 154, 218]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 18, No. of vehicles: 19, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2700
Line 2: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1800
Line 3: Route duration (m): 23, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 7, 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): 8, No. of vehicles: 9, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 6: Route duration (m): 8, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 1, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Final Cost per Line:

Line 1: Bus: 0, e-Bus: 6650000, Battery: 1368000
Line 2: Bus: 0, e-Bus: 5250000, Battery: 1080000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 2450000, Battery: 504000
Line 4: Bus: 0, e-Bus: 3850000, Battery: 792000
Line 5: Bus: 0, e-Bus: 3150000, Battery: 648000
Line 6: Bus: 0, e-Bus: 350000, Battery: 72000

Number of Charging Stations:9,
Final Cost of Charging Stations:540000

Chargers List: {0, 3, 4, 6, 8, 10, 11, 13, 14}

=====
=====

Main Data:

6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer, 0.25 (km/min) bus speed, 90 (kWh) battery capacity, 1.5 (kWh/km) energy consumption, 41.99999999999999 (km) maximum distance, 60000 cost of charging stations

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: [1, 2, 5, 7, 9, 13]
- Line 6: [0, 1, 3, 11]

All users' score:

d0: 84.52%, d1: 14.9%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.78 minutes

Bus passenger demand per link:

- Line 1: [1194, 1528, 1604, 1998, 1932, 1278]
- Line 2: [960, 2336, 2422, 2448, 1610]
- Line 3: [842, 1002, 1110, 1246, 976]
- Line 4: [620, 350, 1300, 848]
- Line 5: [420, 666, 1098, 1110, 584]
- Line 6: [596, 906, 1038]

Bus information per line:

- Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
- 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): 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: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Genetic algorithm data:

Population Size: 20, Elite Size: 8, No of iterations: 150
Objective function: minZ = penalty1*(8*score0[ATT]*dtotal + 80*score0[dun]*dtotal) + penalty2*total_cost

Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel
(Delete/Add node rate): 0.4, Penalty1 (% passenger cost): 0.8, Penalty2 (% electric bus
cost): 0.7

Final Route Set:

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

All users' score:

d0: 90.56%, d1: 8.93%, d2: 0.51%, dun: 0.0%, ATT: 10.65 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [2634, 1854, 1654, 1814, 1810, 1054]
Line 2: [640, 1224, 1624, 1776, 1256, 360]
Line 3: [220, 660, 664, 934, 1060, 910]
Line 4: [620, 410, 1330, 1286, 820]
Line 5: [320, 508, 626, 1042, 1114, 588]
Line 6: [160, 154, 218]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 18, No. of vehicles: 19, Vehicle
type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2700
Line 2: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 15, Vehicle
type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1800
Line 3: Route duration (m): 23, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 7, 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): 8, No. of vehicles: 9, Vehicle type:
A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 6: Route duration (m): 8, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 1, Vehicle type:
N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Final Cost per Line:

Line 1: Bus: 0, e-Bus: 6650000, Battery: 1368000
Line 2: Bus: 0, e-Bus: 5250000, Battery: 1080000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 2450000, Battery: 504000
Line 4: Bus: 0, e-Bus: 3850000, Battery: 792000
Line 5: Bus: 0, e-Bus: 3150000, Battery: 648000
Line 6: Bus: 0, e-Bus: 350000, Battery: 72000

Number of Charging Stations:9,

Final Cost of Charging Stations:540000

Chargers List: {0, 3, 4, 6, 8, 10, 11, 13, 14}

=====
=====
Main Data:

6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer, 0.25 (km/min) bus speed, 90 (kWh) battery capacity, 1.5 (kWh/km) energy consumption, 41.99999999999999 (km) maximum distance, 60000 cost of charging stations

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: [1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

All users' score:

d0: 84.52%, d1: 14.9%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.78 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1194, 1528, 1604, 1998, 1932, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2422, 2448, 1610]
Line 3: [842, 1002, 1110, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [420, 666, 1098, 1110, 584]
Line 6: [596, 906, 1038]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
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): 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: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Genetic algorithm data:

Population Size: 20, Elite Size: 8, No of iterations: 150
Objective function: $\text{minZ} = \text{penalty1} * (8 * \text{score0}[\text{ATT}] * \text{dtotal} + 80 * \text{score0}[\text{dun}] * \text{dtotal}) + \text{penalty2} * \text{total_cost}$
Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4, Penalty1 (% passenger cost): 0.8, Penalty2 (% electric bus cost): 0.8

Final Route Set:

Line 1: [0, 1, 2, 5, 7, 9, 10, 12]
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: [4, 1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [2, 5, 14, 8]

All users' score:

d0: 89.34%, d1: 10.66%, d2: 0.0%, dun: 0.0%, ATT: 11.05 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1558, 1606, 1678, 2016, 1988, 1764, 1020]
Line 2: [640, 2046, 1788, 1804, 604]
Line 3: [1080, 1020, 1066, 980, 956]
Line 4: [372, 360, 1328, 1448, 1024]
Line 5: [320, 592, 698, 1108, 1128, 582]
Line 6: [166, 222, 234]

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): 14, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
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): 10, No. of vehicles: 12, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1500
Line 5: Route duration (m): 29, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 9, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 6: Route duration (m): 14, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Final Cost per Line:

Line 1: Bus: 0, e-Bus: 5950000, Battery: 1224000
Line 2: Bus: 0, e-Bus: 5250000, Battery: 1080000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 2100000, Battery: 432000
Line 4: Bus: 0, e-Bus: 4200000, Battery: 864000
Line 5: Bus: 0, e-Bus: 3150000, Battery: 648000
Line 6: Bus: 0, e-Bus: 700000, Battery: 144000

Number of Charging Stations:8,

Final Cost of Charging Stations:480000

Chargers List: {0, 2, 4, 6, 8, 11, 12, 13}

=====
=====

Main Data:

6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer, 0.25 (km/min) bus speed , 90 (kWh) battery capacity, 1.5 (kWh/km) energy consumption, 41.9999999999999 (km) maximum distance, 60000 cost of charging stations

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: [1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

All users' score:

d0: 84.52%, d1: 14.9%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.78 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1194, 1528, 1604, 1998, 1932, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2422, 2448, 1610]
Line 3: [842, 1002, 1110, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [420, 666, 1098, 1110, 584]
Line 6: [596, 906, 1038]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
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): 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: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Genetic algorithm data:

Population Size: 20, Elite Size: 8, No of iterations: 150
Objective function: $\text{minZ} = \text{penalty1} * (8 * \text{score0}[\text{ATT}] * \text{dtotal} + 80 * \text{score0}[\text{dun}] * \text{dtotal}) + \text{penalty2} * \text{total_cost}$
Pswap (crossover rate): 0.166666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4, Penalty1 (% passenger cost): 0.8, Penalty2 (% electric bus cost): 0.9

Final Route Set:

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

All users' score:

d0: 90.49%, d1: 8.99%, d2: 0.51%, dun: 0.0%, ATT: 10.87 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [2634, 1934, 1764, 1986, 1996, 1766, 850]
Line 2: [638, 1352, 1734, 1796, 602, 168]
Line 3: [540, 606, 888, 998, 910]
Line 4: [614, 410, 1326, 1446, 1024]
Line 5: [320, 508, 626, 1068, 1130, 584]
Line 6: [130, 86, 154]

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): 33, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1800
Line 3: Route duration (m): 13, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 4, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050
Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 12, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1500
Line 5: Route duration (m): 29, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 9, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 6: Route duration (m): 9, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 1, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

Final Cost per Line:

Line 1: Bus: 0, e-Bus: 7700000, Battery: 1584000
Line 2: Bus: 0, e-Bus: 5250000, Battery: 1080000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 1400000, Battery: 288000
Line 4: Bus: 0, e-Bus: 4200000, Battery: 864000
Line 5: Bus: 0, e-Bus: 3150000, Battery: 648000
Line 6: Bus: 0, e-Bus: 350000, Battery: 72000

Number of Charging Stations:10,
Final Cost of Charging Stations:600000

Chargers List: {0, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13}

=====
=====

Main Data:

6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer, 0.25 (km/min) bus speed , 90 (kWh) battery capacity, 1.5 (kWh/km) energy consumption, 41.99999999999999 (km) maximum distance, 60000 cost of charging stations

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: [1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

All users' score:

d0: 84.52%, d1: 14.9%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.78 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1194, 1528, 1604, 1998, 1932, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2422, 2448, 1610]
Line 3: [842, 1002, 1110, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [420, 666, 1098, 1110, 584]
Line 6: [596, 906, 1038]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
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): 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: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Genetic algorithm data:

Population Size: 20, Elite Size: 8, No of iterations: 150
Objective function: $\min Z = \text{penalty1} * (8 * \text{score0}[\text{ATT}] * \text{dtotal} + 80 * \text{score0}[\text{dun}] * \text{dtotal}) + \text{penalty2} * \text{total_cost}$
Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4, Penalty1 (% passenger cost): 0.8, Penalty2 (% electric bus cost): 1.0

Final Route Set:

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

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12, 10]
Line 3: [4, 3, 1, 2, 5, 14, 8]
Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 11]
Line 5: [4, 1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [7, 5, 3, 11]

All users' score:

d0: 87.22%, d1: 10.85%, d2: 1.93%, dun: 0.0%, ATT: 10.93 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [2634, 1854, 1654, 1844, 1810, 1054]
Line 2: [504, 1144, 1644, 1776, 1256, 360]
Line 3: [134, 730, 734, 1004, 1220, 264]
Line 4: [350, 1306, 1320, 1276, 810]
Line 5: [320, 508, 626, 1072, 1114, 588]
Line 6: [164, 238, 228]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 18, No. of vehicles: 19, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2700
Line 2: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1800
Line 3: Route duration (m): 23, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, 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): 29, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 9, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 6: Route duration (m): 16, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Final Cost per Line:

Line 1: Bus: 0, e-Bus: 6650000, Battery: 1368000
Line 2: Bus: 0, e-Bus: 5250000, Battery: 1080000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 2800000, Battery: 576000
Line 4: Bus: 0, e-Bus: 3850000, Battery: 792000
Line 5: Bus: 0, e-Bus: 3150000, Battery: 648000
Line 6: Bus: 0, e-Bus: 700000, Battery: 144000

Number of Charging Stations:7,

Final Cost of Charging Stations:420000

Chargers List: {0, 4, 7, 8, 10, 11, 13}

=====
=====

Main Data:

6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer, 0.25 (km/min) bus speed, 90 (kWh) battery capacity, 1.5 (kWh/km) energy consumption, 41.99999999999999 (km) maximum distance, 60000 cost of charging stations

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: [1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

All users' score:

d0: 84.52%, d1: 14.9%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.78 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1194, 1528, 1604, 1998, 1932, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2422, 2448, 1610]
Line 3: [842, 1002, 1110, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [420, 666, 1098, 1110, 584]
Line 6: [596, 906, 1038]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
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): 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: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Genetic algorithm data:

Population Size: 20, Elite Size: 8, No of iterations: 150
Objective function: $\text{minZ} = \text{penalty1} * (8 * \text{score0}[\text{ATT}] * \text{dtotal} + 80 * \text{score0}[\text{dun}] * \text{dtotal}) + \text{penalty2} * \text{total_cost}$
Pswap (crossover rate): 0.166666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4, Penalty1 (% passenger cost): 0.8, Penalty2 (% electric bus cost): 1.1

Final Route Set:

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

Line 5: [4, 1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [14, 5, 3, 11]

All users' score:

d0: 89.92%, d1: 9.38%, d2: 0.71%, dun: 0.0%, ATT: 10.83 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [2632, 1856, 1660, 1874, 1796, 1132]
Line 2: [636, 1284, 1756, 1804, 1532, 104]
Line 3: [132, 630, 628, 892, 1106, 956]
Line 4: [608, 350, 1320, 1504, 810]
Line 5: [320, 510, 630, 1102, 1110, 492]
Line 6: [108, 204, 94]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 18, No. of vehicles: 19, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2700
Line 2: Route duration (m): 30, Frequency (veh/h): 13, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1950
Line 3: Route duration (m): 23, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 7, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 13, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1650
Line 5: Route duration (m): 29, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 9, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 6: Route duration (m): 17, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Final Cost per Line:

Line 1: Bus: 0, e-Bus: 6650000, Battery: 1368000
Line 2: Bus: 0, e-Bus: 5250000, Battery: 1080000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 2450000, Battery: 504000
Line 4: Bus: 0, e-Bus: 4550000, Battery: 936000
Line 5: Bus: 0, e-Bus: 3150000, Battery: 648000
Line 6: Bus: 0, e-Bus: 700000, Battery: 144000

Number of Charging Stations:8,
Final Cost of Charging Stations:480000

Chargers List: {0, 4, 6, 8, 10, 11, 13, 14}

Main Data:

6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer, 0.25 (km/min) bus speed, 90 (kWh) battery capacity, 1.5 (kWh/km) energy consumption, 41.99999999999999 (km) maximum distance, 60000 cost of charging stations

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: [1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

All users' score:

d0: 84.52%, d1: 14.9%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.78 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1194, 1528, 1604, 1998, 1932, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2422, 2448, 1610]
Line 3: [842, 1002, 1110, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [420, 666, 1098, 1110, 584]
Line 6: [596, 906, 1038]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
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): 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: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Genetic algorithm data:

Population Size: 20, Elite Size: 8, No of iterations: 150
Objective function: $\text{minZ} = \text{penalty1} * (8 * \text{score0}[\text{ATT}] * \text{dtotal} + 80 * \text{score0}[\text{dun}] * \text{dtotal}) + \text{penalty2} * \text{total_cost}$
Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4, Penalty1 (% passenger cost): 0.8, Penalty2 (% electric bus cost): 1.2

Final Route Set:

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

Line 6: [7, 5, 3, 11]

All users' score:

d0: 88.5%, d1: 9.57%, d2: 1.93%, dun: 0.0%, ATT: 10.84 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [2638, 1878, 1696, 1916, 1908, 1660, 1006]

Line 2: [110, 746, 1296, 1446, 570, 130]

Line 3: [208, 728, 732, 1000, 1218, 262]

Line 4: [350, 1306, 1318, 1254, 810]

Line 5: [746, 922, 1028, 1368, 1354, 460]

Line 6: [152, 202, 110]

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): 36, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 14, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1500

Line 3: Route duration (m): 23, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, 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): 29, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 11, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1500

Line 6: Route duration (m): 16, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Final Cost per Line:

Line 1: Bus: 0, e-Bus: 7700000, Battery: 1584000

Line 2: Bus: 0, e-Bus: 4900000, Battery: 1008000

Line 3: Bus: 0, e-Bus: 2800000, Battery: 576000

Line 4: Bus: 0, e-Bus: 3850000, Battery: 792000

Line 4: Bus: 0, e-Bus: 3850000, Battery: 792000

Line 6: Bus: 0, e-Bus: 700000, Battery: 144000

Number of Charging Stations:7,

Final Cost of Charging Stations:420000

Chargers List: {0, 4, 7, 8, 11, 12, 13}

=====
=====

Main Data:

6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer, 0.25 (km/min) bus speed, 90 (kWh) battery capacity, 1.5 (kWh/km) energy consumption, 41.99999999999999 (km) maximum distance, 60000 cost of charging stations

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: [1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

All users' score:

d0: 84.52%, d1: 14.9%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.78 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1194, 1528, 1604, 1998, 1932, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2422, 2448, 1610]
Line 3: [842, 1002, 1110, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [420, 666, 1098, 1110, 584]
Line 6: [596, 906, 1038]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
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): 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: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Genetic algorithm data:

Population Size: 20, Elite Size: 8, No of iterations: 150
Objective function: $\text{minZ} = \text{penalty1} * (8 * \text{score0}[\text{ATT}] * \text{dtotal} + 80 * \text{score0}[\text{dun}] * \text{dtotal}) + \text{penalty2} * \text{total_cost}$
Pswap (crossover rate): 0.166666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4, Penalty1 (% passenger cost): 0.8, Penalty2 (% electric bus cost): 1.3

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, 3, 1, 2, 5, 14, 8]
Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 11]
Line 5: [4, 1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [7, 5, 3, 11]

All users' score:

d0: 88.57%, d1: 9.51%, d2: 1.93%, dun: 0.0%, ATT: 10.76 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [2640, 1872, 1684, 1908, 1904, 1660, 1006]

Line 2: [504, 1148, 1606, 1706, 570, 130]

Line 3: [134, 730, 732, 1000, 1220, 264]

Line 4: [350, 1306, 1318, 1258, 810]

Line 5: [320, 502, 614, 1060, 1102, 460]

Line 6: [162, 234, 228]

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): 12, No. of vehicles: 14, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1800

Line 3: Route duration (m): 23, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, 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): 29, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 9, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200

Line 6: Route duration (m): 16, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Final Cost per Line:

Line 1: Bus: 0, e-Bus: 7700000, Battery: 1584000

Line 2: Bus: 0, e-Bus: 4900000, Battery: 1008000

Line 3: Bus: 0, e-Bus: 2800000, Battery: 576000

Line 4: Bus: 0, e-Bus: 3850000, Battery: 792000

Line 5: Bus: 0, e-Bus: 3150000, Battery: 648000

Line 6: Bus: 0, e-Bus: 700000, Battery: 144000

Number of Charging Stations:7,

Final Cost of Charging Stations:420000

Chargers List: {0, 4, 7, 8, 11, 12, 13}

=====
=====

Main Data:

6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer, 0.25 (km/min) bus speed, 90 (kWh) battery capacity, 1.5 (kWh/km) energy consumption, 41.99999999999999 (km) maximum distance, 60000 cost of charging stations

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: [1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

All users' score:

d0: 84.52%, d1: 14.9%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.78 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1194, 1528, 1604, 1998, 1932, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2422, 2448, 1610]
Line 3: [842, 1002, 1110, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [420, 666, 1098, 1110, 584]
Line 6: [596, 906, 1038]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
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): 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: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Genetic algorithm data:

Population Size: 20, Elite Size: 8, No of iterations: 150
Objective function: $\min Z = \text{penalty1} * (8 * \text{score0}[\text{ATT}] * \text{dtotal} + 80 * \text{score0}[\text{dun}] * \text{dtotal}) + \text{penalty2} * \text{total_cost}$
Pswap (crossover rate): 0.166666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4, Penalty1 (% passenger cost): 0.8, Penalty2 (% electric bus cost): 1.4

Final Route Set:

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

All users' score:

d0: 89.79%, d1: 9.7%, d2: 0.51%, dun: 0.0%, ATT: 10.9 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [2632, 1914, 1726, 1898, 1902, 1100]
Line 2: [640, 1294, 1700, 1866, 1256, 360]
Line 3: [540, 614, 904, 1060, 910]
Line 4: [620, 410, 1330, 1444, 1024]
Line 5: [320, 514, 638, 1060, 1136, 588]
Line 6: [160, 144, 208]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 18, No. of vehicles: 19, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2700
Line 2: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 13, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1950
Line 3: Route duration (m): 13, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 4, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 12, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1500
Line 5: Route duration (m): 29, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 9, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 6: Route duration (m): 8, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 1, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Final Cost per Line:

Line 1: Bus: 0, e-Bus: 6650000, Battery: 1368000
Line 2: Bus: 0, e-Bus: 5600000, Battery: 1152000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 1400000, Battery: 288000
Line 4: Bus: 0, e-Bus: 4200000, Battery: 864000
Line 5: Bus: 0, e-Bus: 3150000, Battery: 648000
Line 6: Bus: 0, e-Bus: 350000, Battery: 72000

Number of Charging Stations:9,
Final Cost of Charging Stations:540000

Chargers List: {0, 3, 4, 6, 8, 10, 11, 13, 14}

Main Data:

6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer, 0.25 (km/min) bus speed , 90 (kWh) battery capacity, 1.5 (kWh/km) energy consumption,41.99999999999999 (km) maximum distance, 60000 cost of charging stations

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: [1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

All users' score:

d0: 84.52%, d1: 14.9%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.78 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1194, 1528, 1604, 1998, 1932, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2422, 2448, 1610]
Line 3: [842, 1002, 1110, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [420, 666, 1098, 1110, 584]
Line 6: [596, 906, 1038]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
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): 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: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Genetic algorithm data:

Population Size: 20, Elite Size: 8, No of iterations: 150
Objective function: $\min Z = \text{penalty1} * (8 * \text{score0}[\text{ATT}] * \text{dtotal} + 80 * \text{score0}[\text{dun}] * \text{dtotal}) + \text{penalty2} * \text{total_cost}$
Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4, Penalty1 (% passenger cost): 0.8, Penalty2 (% electric bus cost): 1.5

Final Route Set:

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

All users' score:

d0: 85.74%, d1: 11.11%, d2: 3.15%, dun: 0.0%, ATT: 11.24 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [2638, 2120, 2120, 1968, 1998, 1764, 1020]
Line 2: [638, 1210, 1646, 1782, 604]
Line 3: [650, 450, 1086]
Line 4: [618, 1318, 1328, 1438, 1024]
Line 5: [320, 626, 850, 1048, 1124, 576]
Line 6: [130, 110, 136]

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): 28, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 13, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1800
Line 3: Route duration (m): 10, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 3, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 12, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1500
Line 5: Route duration (m): 29, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 9, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 6: Route duration (m): 8, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 1, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

Final Cost per Line:

Line 1: Bus: 0, e-Bus: 7700000, Battery: 1584000
Line 2: Bus: 0, e-Bus: 4550000, Battery: 936000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 1050000, Battery: 216000
Line 4: Bus: 0, e-Bus: 4200000, Battery: 864000
Line 5: Bus: 0, e-Bus: 3150000, Battery: 648000
Line 6: Bus: 0, e-Bus: 350000, Battery: 72000

Number of Charging Stations:9,
Final Cost of Charging Stations:540000

Chargers List:
{0, 1, 3, 4, 8, 11, 12, 13, 14}

- Παράμετρος: Κόστος φορτιστών

=====
=====

Main Data:

6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer, 0.25 (km/min) bus speed
, 90 (kWh) battery capacity, 1.5 (kWh/km) energy consumption, 41.99999999999999 (km)
maximum distance, 30000 cost of charging stations

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: [1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

All users' score:

d0: 84.52%, d1: 14.9%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.78 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1194, 1528, 1604, 1998, 1932, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2422, 2448, 1610]
Line 3: [842, 1002, 1110, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [420, 666, 1098, 1110, 584]
Line 6: [596, 906, 1038]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 15, Vehicle type:
A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
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): 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: A,
Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Genetic algorithm data:

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

Objective function: $\min Z = \text{penalty1} * (8 * \text{score0}[\text{ATT}] * \text{dtotal} + 80 * \text{score0}[\text{dun}] * \text{dtotal}) + \text{penalty2} * \text{total_cost}$

Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4, Penalty1 (% passenger cost): 0.8, Penalty2 (% electric bus cost): 0.5

Final Route Set:

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

All users' score:

d0: 91.91%, d1: 7.39%, d2: 0.71%, dun: 0.0%, ATT: 10.52 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [2640, 1900, 1668, 1930, 1896, 1660, 1006]
Line 2: [638, 1418, 1726, 1722, 570, 130]
Line 3: [220, 690, 664, 768, 794, 632]
Line 4: [612, 360, 1328, 1276, 820]
Line 5: [320, 502, 584, 1086, 1102, 460]
Line 6: [236, 412, 322]

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): 12, No. of vehicles: 14, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1800
Line 3: Route duration (m): 23, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 9, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 800
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): 8, No. of vehicles: 9, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 6: Route duration (m): 8, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Final Cost per Line:

Line 1: Bus: 0, e-Bus: 7700000, Battery: 1584000
Line 2: Bus: 0, e-Bus: 4900000, Battery: 1008000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 3150000, Battery: 648000
Line 4: Bus: 0, e-Bus: 3850000, Battery: 792000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 3150000, Battery: 648000
Line 6: Bus: 0, e-Bus: 700000, Battery: 144000

Number of Charging Stations:8,
Final Cost of Charging Stations:240000

Chargers List: {0, 2, 4, 6, 8, 11, 12, 13}

=====
=====

Main Data:

6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer, 0.25 (km/min) bus speed
, 90 (kWh) battery capacity, 1.5 (kWh/km) energy consumption,41.99999999999999 (km)
maximum distance, 40000 cost of charging stations

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: [1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

All users' score:

d0: 84.52%, d1: 14.9%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.78 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1194, 1528, 1604, 1998, 1932, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2422, 2448, 1610]
Line 3: [842, 1002, 1110, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [420, 666, 1098, 1110, 584]
Line 6: [596, 906, 1038]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 15, Vehicle type:
A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
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): 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: A,
Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Genetic algorithm data:

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

Objective function: $\min Z = \text{penalty1} * (8 * \text{score0}[\text{ATT}] * \text{dttotal} + 80 * \text{score0}[\text{dun}] * \text{dttotal}) + \text{penalty2} * \text{total_cost}$

Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4, Penalty1 (% passenger cost): 0.8, Penalty2 (% electric bus cost): 0.5

Final Route Set:

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

All users' score:

d0: 83.24%, d1: 16.38%, d2: 0.39%, dun: 0.0%, ATT: 11.4 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [2632, 1896, 1530, 660, 484]
Line 2: [570, 1972, 2454, 2616, 1282, 340]
Line 3: [230, 470, 560, 412, 330]
Line 4: [612, 414, 1438, 2544, 1036]
Line 5: [160, 930, 1410, 2346, 2208, 586]
Line 6: [182, 238, 190]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 18, No. of vehicles: 12, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2700
Line 2: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 18, No. of vehicles: 22, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2700
Line 3: Route duration (m): 16, Frequency (veh/h): 7.0, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560.0

Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 17, No. of vehicles: 20, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2550
Line 5: Route duration (m): 29, Frequency (veh/h): 16, No. of vehicles: 18, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2400
Line 6: Route duration (m): 8, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 1, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240
Final Cost per Line:

Line 1: Bus: 0, e-Bus: 4200000, Battery: 864000
Line 2: Bus: 0, e-Bus: 7700000, Battery: 1584000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 1750000, Battery: 360000
Line 4: Bus: 0, e-Bus: 7000000, Battery: 1440000
Line 5: Bus: 0, e-Bus: 6300000, Battery: 1296000
Line 6: Bus: 0, e-Bus: 350000, Battery: 72000

Number of Charging Stations:8,
Final Cost of Charging Stations:320000

Chargers List: {0, 2, 4, 6, 8, 10, 11, 13}

=====
=====

Main Data:

6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer, 0.25 (km/min) bus speed, 90 (kWh) battery capacity, 1.5 (kWh/km) energy consumption, 41.99999999999999 (km) maximum distance, 50000 cost of charging stations

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: [1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

All users' score:

d0: 84.52%, d1: 14.9%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.78 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1194, 1528, 1604, 1998, 1932, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2422, 2448, 1610]
Line 3: [842, 1002, 1110, 1246, 976]

Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [420, 666, 1098, 1110, 584]
Line 6: [596, 906, 1038]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
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): 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: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Genetic algorithm data:

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

Objective function: $\min Z = \text{penalty1} * (8 * \text{score0}[\text{ATT}] * \text{dtotal} + 80 * \text{score0}[\text{dun}] * \text{dtotal}) + \text{penalty2} * \text{total_cost}$

Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4, Penalty1 (% passenger cost): 0.8, Penalty2 (% electric bus cost): 0.5

Final Route Set:

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

All users' score:

d0: 83.24%, d1: 16.38%, d2: 0.39%, dun: 0.0%, ATT: 11.4 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [2632, 1896, 1530, 660, 484]
Line 2: [570, 1972, 2454, 2616, 1282, 340]

Line 3: [230, 470, 560, 412, 330]
Line 4: [612, 414, 1438, 2544, 1036]
Line 5: [160, 930, 1410, 2346, 2208, 586]
Line 6: [182, 238, 190]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 18, Frequency (veh/h): 18, No. of vehicles: 12, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2700
Line 2: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 18, No. of vehicles: 22, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2700
Line 3: Route duration (m): 16, Frequency (veh/h): 7.0, No. of vehicles: 5, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 560.0
Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 17, No. of vehicles: 20, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2550
Line 5: Route duration (m): 29, Frequency (veh/h): 16, No. of vehicles: 18, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2400
Line 6: Route duration (m): 8, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 1, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Final Cost per Line:

Line 1: Bus: 0, e-Bus: 4200000, Battery: 864000
Line 2: Bus: 0, e-Bus: 7700000, Battery: 1584000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 1750000, Battery: 360000
Line 4: Bus: 0, e-Bus: 7000000, Battery: 1440000
Line 5: Bus: 0, e-Bus: 6300000, Battery: 1296000
Line 6: Bus: 0, e-Bus: 350000, Battery: 72000

Number of Charging Stations:8,
Final Cost of Charging Stations:400000

Chargers List: {0, 2, 4, 6, 8, 10, 11, 13}

=====
=====

Main Data:

6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer, 0.25 (km/min) bus speed , 90 (kWh) battery capacity, 1.5 (kWh/km) energy consumption,41.99999999999999 (km) maximum distance, 70000 cost of charging stations

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: [1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

All users' score:

d0: 84.52%, d1: 14.9%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.78 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1194, 1528, 1604, 1998, 1932, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2422, 2448, 1610]
Line 3: [842, 1002, 1110, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [420, 666, 1098, 1110, 584]
Line 6: [596, 906, 1038]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
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): 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: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Genetic algorithm data:

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

Objective function: $\min Z = \text{penalty1} * (8 * \text{score0}[\text{ATT}] * \text{dtotal} + 80 * \text{score0}[\text{dun}] * \text{dtotal}) + \text{penalty2} * \text{total_cost}$

Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4, Penalty1 (% passenger cost): 0.8, Penalty2 (% electric bus cost): 0.5

Final Route Set:

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

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12, 10]
Line 3: [3, 1, 2, 5, 14, 6]
Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 11]
Line 5: [4, 1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [14, 7, 5, 3]

All users' score:

d0: 89.79%, d1: 9.7%, d2: 0.51%, dun: 0.0%, ATT: 10.9 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [2632, 1914, 1726, 1898, 1902, 1100]
Line 2: [640, 1294, 1700, 1866, 1256, 360]
Line 3: [540, 614, 904, 1060, 910]
Line 4: [620, 410, 1330, 1444, 1024]
Line 5: [320, 514, 638, 1060, 1136, 588]
Line 6: [160, 144, 208]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 18, No. of vehicles: 19, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2700
Line 2: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 13, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1950
Line 3: Route duration (m): 13, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 4, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 12, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1500
Line 5: Route duration (m): 29, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 9, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 6: Route duration (m): 8, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 1, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240
Final Cost per Line:

Line 1: Bus: 0, e-Bus: 6650000, Battery: 1368000
Line 2: Bus: 0, e-Bus: 5600000, Battery: 1152000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 1400000, Battery: 288000
Line 4: Bus: 0, e-Bus: 4200000, Battery: 864000
Line 5: Bus: 0, e-Bus: 3150000, Battery: 648000
Line 6: Bus: 0, e-Bus: 350000, Battery: 72000

Number of Charging Stations:9,
Final Cost of Charging Stations:630000

Chargers List: {0, 3, 4, 6, 8, 10, 11, 13, 14}

=====
=====

Main Data:

6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer, 0.25 (km/min) bus speed , 90 (kWh) battery capacity, 1.5 (kWh/km) energy consumption, 41.99999999999999 (km) maximum distance, 80000 cost of charging stations

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: [1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

All users' score:

d0: 84.52%, d1: 14.9%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.78 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1194, 1528, 1604, 1998, 1932, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2422, 2448, 1610]
Line 3: [842, 1002, 1110, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [420, 666, 1098, 1110, 584]
Line 6: [596, 906, 1038]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
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): 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: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Genetic algorithm data:

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

Objective function: $\min Z = \text{penalty1} * (8 * \text{score0}[\text{ATT}] * \text{dtotal} + 80 * \text{score0}[\text{dun}] * \text{dtotal}) + \text{penalty2} * \text{total_cost}$

Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4, Penalty1 (% passenger cost): 0.8, Penalty2 (% electric bus cost): 0.5

Final Route Set:

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

All users' score:

d0: 88.57%, d1: 10.92%, d2: 0.51%, dun: 0.0%, ATT: 11.18 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [2634, 1914, 1724, 1890, 1888, 1174]
Line 2: [640, 1294, 1706, 1878, 1612]
Line 3: [540, 614, 904, 1060, 910]
Line 4: [620, 410, 1330, 1668, 1024]
Line 5: [320, 514, 638, 1060, 1136, 588]
Line 6: [160, 144, 208]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 18, No. of vehicles: 19, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2700
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): 13, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 4, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1800
Line 5: Route duration (m): 29, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 9, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 6: Route duration (m): 8, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 1, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240

Final Cost per Line:

Line 1: Bus: 0, e-Bus: 6650000, Battery: 1368000
Line 2: Bus: 0, e-Bus: 4900000, Battery: 1008000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 1400000, Battery: 288000
Line 4: Bus: 0, e-Bus: 5250000, Battery: 1080000
Line 5: Bus: 0, e-Bus: 3150000, Battery: 648000
Line 6: Bus: 0, e-Bus: 350000, Battery: 72000

Number of Charging Stations:10,
Final Cost of Charging Stations:800000

Chargers List: {0, 3, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 13, 14}

=====
=====

Main Data:

6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer, 0.25 (km/min) bus speed
, 90 (kWh) battery capacity, 1.5 (kWh/km) energy consumption,41.99999999999999 (km)
maximum distance, 90000 cost of charging stations

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: [1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

All users' score:

d0: 84.52%, d1: 14.9%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.78 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1194, 1528, 1604, 1998, 1932, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2422, 2448, 1610]
Line 3: [842, 1002, 1110, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [420, 666, 1098, 1110, 584]
Line 6: [596, 906, 1038]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 15, Vehicle type:
A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
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): 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: A,
Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Genetic algorithm data:

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

Objective function: $\min Z = \text{penalty1} * (8 * \text{score0}[\text{ATT}] * \text{dttotal} + 80 * \text{score0}[\text{dun}] * \text{dttotal}) + \text{penalty2} * \text{total_cost}$

Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4, Penalty1 (% passenger cost): 0.8, Penalty2 (% electric bus cost): 0.5

Final Route Set:

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

All users' score:

d0: 90.56%, d1: 8.73%, d2: 0.71%, dun: 0.0%, ATT: 10.69 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [2634, 1882, 1638, 1866, 1802, 1054]
Line 2: [638, 1414, 1766, 1794, 1258, 360]
Line 3: [220, 690, 666, 772, 794, 632]
Line 4: [612, 360, 1330, 1294, 820]
Line 5: [320, 508, 596, 1096, 1110, 584]
Line 6: [238, 412, 322]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 18, No. of vehicles: 19, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2700
Line 2: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1800
Line 3: Route duration (m): 23, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 9, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 800

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): 8, No. of vehicles: 9, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 6: Route duration (m): 8, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480
Final Cost per Line:

Line 1: Bus: 0, e-Bus: 6650000, Battery: 1368000
Line 2: Bus: 0, e-Bus: 5250000, Battery: 1080000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 3150000, Battery: 648000
Line 4: Bus: 0, e-Bus: 3850000, Battery: 792000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 3150000, Battery: 648000
Line 6: Bus: 0, e-Bus: 700000, Battery: 144000

Number of Charging Stations:8,
Final Cost of Charging Stations:720000

Chargers List: {0, 2, 4, 6, 8, 10, 11, 13}

=====
=====

Main Data:

6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer, 0.25 (km/min) bus speed , 90 (kWh) battery capacity, 1.5 (kWh/km) energy consumption,41.99999999999999 (km) maximum distance, 100000 cost of charging stations

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: [1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

All users' score:

d0: 84.52%, d1: 14.9%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.78 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1194, 1528, 1604, 1998, 1932, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2422, 2448, 1610]
Line 3: [842, 1002, 1110, 1246, 976]

Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [420, 666, 1098, 1110, 584]
Line 6: [596, 906, 1038]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
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): 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: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Genetic algorithm data:

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

Objective function: $\min Z = \text{penalty1} * (8 * \text{score0}[\text{ATT}] * \text{dtotal} + 80 * \text{score0}[\text{dun}] * \text{dtotal}) + \text{penalty2} * \text{total_cost}$

Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4, Penalty1 (% passenger cost): 0.8, Penalty2 (% electric bus cost): 0.5

Final Route Set:

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

All users' score:

d0: 88.57%, d1: 10.92%, d2: 0.51%, dun: 0.0%, ATT: 11.18 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [2634, 1914, 1724, 1890, 1888, 1174]
Line 2: [640, 1294, 1706, 1878, 1612]

Line 3: [540, 614, 904, 1060, 910]
Line 4: [620, 410, 1330, 1668, 1024]
Line 5: [320, 514, 638, 1060, 1136, 588]
Line 6: [160, 144, 208]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 18, No. of vehicles: 19, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2700
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): 13, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 4, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1800
Line 5: Route duration (m): 29, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 9, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 6: Route duration (m): 8, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 1, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240
Final Cost per Line:

Line 1: Bus: 0, e-Bus: 6650000, Battery: 1368000
Line 2: Bus: 0, e-Bus: 4900000, Battery: 1008000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 1400000, Battery: 288000
Line 4: Bus: 0, e-Bus: 5250000, Battery: 1080000
Line 5: Bus: 0, e-Bus: 3150000, Battery: 648000
Line 6: Bus: 0, e-Bus: 350000, Battery: 72000

Number of Charging Stations:10,
Final Cost of Charging Stations:1000000

Chargers List: {0, 3, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 13, 14}

- Παράμετρος: Μπαταρία

=====
=====

Main Data:

6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer, 0.25 (km/min) bus speed , 60 (kWh) battery capacity, 1.5 (kWh/km) energy consumption,28.0 (km) maximum distance, 60000 cost of charging stations

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: [1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

All users' score:

d0: 84.52%, d1: 14.9%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.78 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1194, 1528, 1604, 1998, 1932, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2422, 2448, 1610]
Line 3: [842, 1002, 1110, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [420, 666, 1098, 1110, 584]
Line 6: [596, 906, 1038]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
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): 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: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Genetic algorithm data:

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

Objective function: $\min Z = \text{penalty1} * (8 * \text{score0}[\text{ATT}] * \text{dtotal} + 80 * \text{score0}[\text{dun}] * \text{dtotal}) + \text{penalty2} * \text{total_cost}$

Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4, Penalty1 (% passenger cost): 0.8, Penalty2 (% electric bus cost): 0.5

Final Route Set:

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

All users' score:

d0: 91.27%, d1: 8.03%, d2: 0.71%, dun: 0.0%, ATT: 10.66 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [2640, 1834, 1624, 1930, 1896, 1718, 1020]
Line 2: [640, 1416, 1720, 1714, 604]
Line 3: [220, 690, 628, 848, 1096, 956]
Line 4: [610, 360, 1328, 1290, 820]
Line 5: [320, 464, 554, 1088, 1106, 582]
Line 6: [138, 228, 110]

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): 28, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 13, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1800
Line 3: Route duration (m): 23, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 7, 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): 8, No. of vehicles: 9, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 6: Route duration (m): 8, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 1, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240
Final Cost per Line:

Line 1: Bus: 0, e-Bus: 7700000, Battery: 1056000
Line 2: Bus: 0, e-Bus: 4550000, Battery: 624000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 2450000, Battery: 336000
Line 4: Bus: 0, e-Bus: 3850000, Battery: 528000
Line 5: Bus: 0, e-Bus: 3150000, Battery: 432000
Line 6: Bus: 0, e-Bus: 350000, Battery: 48000

Number of Charging Stations:9,
Final Cost of Charging Stations:540000

Chargers List: {0, 1, 4, 6, 8, 11, 12, 13, 14}

=====
=====

Main Data:

6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer, 0.25 (km/min) bus speed
, 70 (kWh) battery capacity, 1.5 (kWh/km) energy consumption, 32.666666666666664 (km)
maximum distance, 60000 cost of charging stations

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: [1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

All users' score:

d0: 84.52%, d1: 14.9%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.78 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1194, 1528, 1604, 1998, 1932, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2422, 2448, 1610]
Line 3: [842, 1002, 1110, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [420, 666, 1098, 1110, 584]
Line 6: [596, 906, 1038]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
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): 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: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Genetic algorithm data:

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

Objective function: $\min Z = \text{penalty1} * (8 * \text{score0}[\text{ATT}] * \text{dtotal} + 80 * \text{score0}[\text{dun}] * \text{dtotal}) + \text{penalty2} * \text{total_cost}$

Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4, Penalty1 (% passenger cost): 0.8, Penalty2 (% electric bus cost): 0.5

Final Route Set:

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

All users' score:

d0: 87.09%, d1: 12.01%, d2: 0.9%, dun: 0.0%, ATT: 11.38 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [2638, 2166, 1972, 2022, 1992, 1764, 1020]
Line 2: [1604, 1426, 1504, 594]
Line 3: [498, 736, 736, 588]
Line 4: [610, 360, 1328, 1444, 1024]
Line 5: [946, 1194, 1268, 1444, 1410, 582]
Line 6: [270, 470, 368]

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): 24, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 10, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1650
Line 3: Route duration (m): 10, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 4, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 800
Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 12, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1500
Line 5: Route duration (m): 29, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 11, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1500
Line 6: Route duration (m): 8, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480

Final Cost per Line:

Line 1: Bus: 0, e-Bus: 7700000, Battery: 1232000
Line 2: Bus: 0, e-Bus: 3500000, Battery: 560000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 1400000, Battery: 224000
Line 4: Bus: 0, e-Bus: 4200000, Battery: 672000

Line 5: Bus: 0, e-Bus: 3850000, Battery: 616000
Line 6: Bus: 0, e-Bus: 700000, Battery: 112000

Number of Charging Stations:10,
Final Cost of Charging Stations:600000

Chargers List: {0, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 11, 12, 13}

=====
=====

Main Data:

6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer, 0.25 (km/min) bus speed
, 80 (kWh) battery capacity, 1.5 (kWh/km) energy consumption,37.33333333333336 (km)
maximum distance, 60000 cost of charging stations

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: [1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

All users' score:

d0: 84.52%, d1: 14.9%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.78 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1194, 1528, 1604, 1998, 1932, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2422, 2448, 1610]
Line 3: [842, 1002, 1110, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [420, 666, 1098, 1110, 584]
Line 6: [596, 906, 1038]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 15, Vehicle type:
A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
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): 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: A,
Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Genetic algorithm data:

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

Objective function: $\min Z = \text{penalty1} * (8 * \text{score0}[\text{ATT}] * \text{dttotal} + 80 * \text{score0}[\text{dun}] * \text{dttotal}) + \text{penalty2} * \text{total_cost}$

Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4, Penalty1 (% passenger cost): 0.8, Penalty2 (% electric bus cost): 0.5

Final Route Set:

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

All users' score:

d0: 90.56%, d1: 8.73%, d2: 0.71%, dun: 0.0%, ATT: 10.69 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [2634, 1882, 1638, 1866, 1802, 1054]
Line 2: [638, 1414, 1766, 1794, 1258, 360]
Line 3: [220, 690, 666, 772, 794, 632]
Line 4: [612, 360, 1330, 1294, 820]
Line 5: [320, 508, 596, 1096, 1110, 584]
Line 6: [238, 412, 322]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 18, No. of vehicles: 19, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2700
Line 2: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1800
Line 3: Route duration (m): 23, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 9, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 800

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): 8, No. of vehicles: 9, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 6: Route duration (m): 8, Frequency (veh/h): 6, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 480
Final Cost per Line:

Line 1: Bus: 0, e-Bus: 6650000, Battery: 1216000
Line 2: Bus: 0, e-Bus: 5250000, Battery: 960000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 3150000, Battery: 576000
Line 4: Bus: 0, e-Bus: 3850000, Battery: 704000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 3150000, Battery: 576000
Line 6: Bus: 0, e-Bus: 700000, Battery: 128000

Number of Charging Stations:8,
Final Cost of Charging Stations:480000

Chargers List: {0, 2, 4, 6, 8, 10, 11, 13}

=====
=====

Main Data:

6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer, 0.25 (km/min) bus speed, 100 (kWh) battery capacity, 1.5 (kWh/km) energy consumption, 46.66666666666664 (km) maximum distance, 60000 cost of charging stations

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: [1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

All users' score:

d0: 84.52%, d1: 14.9%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.78 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1194, 1528, 1604, 1998, 1932, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2422, 2448, 1610]
Line 3: [842, 1002, 1110, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]

Line 5: [420, 666, 1098, 1110, 584]
Line 6: [596, 906, 1038]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
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): 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: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Genetic algorithm data:

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

Objective function: $\min Z = \text{penalty1} * (8 * \text{score0}[\text{ATT}] * \text{dtotal} + 80 * \text{score0}[\text{dun}] * \text{dtotal}) + \text{penalty2} * \text{total_cost}$

Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4, Penalty1 (% passenger cost): 0.8, Penalty2 (% electric bus cost): 0.5

Final Route Set:

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

All users' score:

d0: 91.39%, d1: 7.9%, d2: 0.71%, dun: 0.0%, ATT: 10.64 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [2640, 1872, 1684, 1908, 1904, 1718, 1020]
Line 2: [638, 1214, 1600, 1698, 604]
Line 3: [128, 660, 662, 930, 1210, 956]

Line 4: [614, 360, 1328, 1282, 820]
Line 5: [320, 502, 614, 1064, 1110, 586]
Line 6: [164, 228, 88]

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): 28, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 13, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1800
Line 3: Route duration (m): 23, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 8, 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): 29, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 9, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 6: Route duration (m): 16, Frequency (veh/h): 3, No. of vehicles: 2, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 240
Final Cost per Line:

Line 1: Bus: 0, e-Bus: 7700000, Battery: 1760000
Line 2: Bus: 0, e-Bus: 4550000, Battery: 1040000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 2800000, Battery: 640000
Line 4: Bus: 0, e-Bus: 3850000, Battery: 880000
Line 5: Bus: 0, e-Bus: 3150000, Battery: 720000
Line 6: Bus: 0, e-Bus: 700000, Battery: 160000

Number of Charging Stations:8,
Final Cost of Charging Stations:480000

Chargers List: {0, 4, 6, 7, 8, 11, 12, 13}

- Παράμετρος: Κατανάλωση Ενέργειας

=====
=====

Main Data:

6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer, 0.25 (km/min) bus speed , 90 (kWh) battery capacity, 2.0 (kWh/km) energy consumption,31.499999999999996 (km) maximum distance, 60000 cost of charging stations

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: [1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

All users' score:

d0: 84.52%, d1: 14.9%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.78 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1194, 1528, 1604, 1998, 1932, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2422, 2448, 1610]
Line 3: [842, 1002, 1110, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [420, 666, 1098, 1110, 584]
Line 6: [596, 906, 1038]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
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): 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: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Genetic algorithm data:

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

Objective function: $\min Z = \text{penalty1} * (8 * \text{score0}[\text{ATT}] * \text{dtotal} + 80 * \text{score0}[\text{dun}] * \text{dtotal}) + \text{penalty2} * \text{total_cost}$

Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4, Penalty1 (% passenger cost): 0.8, Penalty2 (% electric bus cost): 0.5

Final Route Set:

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

Line 2: [4, 3, 5, 7, 9, 12, 10]
Line 3: [3, 1, 2, 5, 14, 6]
Line 4: [8, 14, 6, 9, 10, 11]
Line 5: [4, 1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [3, 5, 14, 7]

All users' score:

d0: 89.79%, d1: 9.7%, d2: 0.51%, dun: 0.0%, ATT: 10.9 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [2628, 1916, 1734, 1922, 1902, 1104]
Line 2: [638, 1352, 1778, 1874, 1256, 360]
Line 3: [540, 608, 892, 998, 910]
Line 4: [614, 410, 1330, 1448, 1024]
Line 5: [320, 514, 638, 1076, 1134, 586]
Line 6: [154, 86, 130]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 18, No. of vehicles: 19, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2700
Line 2: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 13, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1950
Line 3: Route duration (m): 13, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 4, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050
Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 12, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1500
Line 5: Route duration (m): 29, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 9, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 6: Route duration (m): 9, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 1, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

Final Cost per Line:

Line 1: Bus: 0, e-Bus: 6650000, Battery: 1368000
Line 2: Bus: 0, e-Bus: 5600000, Battery: 1152000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 1400000, Battery: 288000
Line 4: Bus: 0, e-Bus: 4200000, Battery: 864000
Line 5: Bus: 0, e-Bus: 3150000, Battery: 648000
Line 6: Bus: 0, e-Bus: 350000, Battery: 72000

Number of Charging Stations:9,

Final Cost of Charging Stations:540000

Chargers List: {0, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 13}

=====
=====

Main Data:

6 lines, 4-8 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer, 0.25 (km/min) bus speed , 90 (kWh) battery capacity, 2.5 (kWh/km) energy consumption, 25.199999999999996 (km) maximum distance, 60000 cost of charging stations

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: [1, 2, 5, 7, 9, 13]
Line 6: [0, 1, 3, 11]

All users' score:

d0: 84.52%, d1: 14.9%, d2: 0.58%, dun: 0.0%, ATT: 11.78 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [1194, 1528, 1604, 1998, 1932, 1278]
Line 2: [960, 2336, 2422, 2448, 1610]
Line 3: [842, 1002, 1110, 1246, 976]
Line 4: [620, 350, 1300, 848]
Line 5: [420, 666, 1098, 1110, 584]
Line 6: [596, 906, 1038]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
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): 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: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050

Genetic algorithm data:

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

Objective function: $\min Z = \text{penalty1} * (8 * \text{score0}[\text{ATT}] * \text{dtotal} + 80 * \text{score0}[\text{dun}] * \text{dtotal}) + \text{penalty2} * \text{total_cost}$

Pswap (crossover rate): 0.16666666666666666, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4, Penalty1 (% passenger cost): 0.8, Penalty2 (% electric bus cost): 0.5

Final Route Set:

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

All users' score:

d0: 89.79%, d1: 9.7%, d2: 0.51%, dun: 0.0%, ATT: 10.9 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [2628, 1916, 1734, 1922, 1902, 1104]
Line 2: [638, 1352, 1778, 1874, 1256, 360]
Line 3: [540, 608, 892, 998, 910]
Line 4: [614, 410, 1330, 1448, 1024]
Line 5: [320, 514, 638, 1076, 1134, 586]
Line 6: [154, 86, 130]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 18, No. of vehicles: 19, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2700
Line 2: Route duration (m): 33, Frequency (veh/h): 13, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1950
Line 3: Route duration (m): 13, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 4, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050
Line 4: Route duration (m): 32, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 12, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1500
Line 5: Route duration (m): 29, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 9, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 6: Route duration (m): 9, Frequency (veh/h): 2, No. of vehicles: 1, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 160

Final Cost per Line:

Line 1: Bus: 0, e-Bus: 6650000, Battery: 1368000
Line 2: Bus: 0, e-Bus: 5600000, Battery: 1152000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 1400000, Battery: 288000
Line 4: Bus: 0, e-Bus: 4200000, Battery: 864000
Line 5: Bus: 0, e-Bus: 3150000, Battery: 648000

Line 6: Bus: 0, e-Bus: 350000, Battery: 72000

Number of Charging Stations:9,
Final Cost of Charging Stations:540000

Chargers List: {0, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 13}

- **Βασικό σενάριο Mumford0**

=====
=====

Main Data:

9 lines, 4-15 nodes per line, 5 minutes penalty for every transfer, 0.25 (km/min) bus speed ,
90 (kWh) battery capacity, 1.5 (kWh/km) energy consumption,41.99999999999999 (km) maximum
distance, 60000 cost of charging stations

Initial Route Set:

Line 1: [12, 17, 22, 18, 13, 6, 15, 2, 21, 5]
Line 2: [4, 20, 24, 23, 3, 11, 17, 19, 22, 18, 13, 6, 15]
Line 3: [24, 1, 9, 3, 11, 17, 28, 16, 27, 2, 29, 10]
Line 4: [10, 15, 21, 5, 6, 13, 18, 19]
Line 5: [20, 24, 1, 9, 14, 7, 27, 2, 29, 10, 15]
Line 6: [14, 4, 20, 24, 23, 3, 11, 25, 28, 16, 27, 2, 29, 10]
Line 7: [20, 23, 24, 4, 14, 7, 28, 16, 27, 2, 29, 10, 15]
Line 8: [4, 20, 24, 1, 9, 3, 11, 17, 19, 22, 25, 28, 16, 27, 2]
Line 9: [14, 11, 17, 12, 8, 26, 0, 22, 25, 28, 16, 15, 10]

All users' score:

d0: 54.79%, d1: 40.01%, d2: 5.2%, dun: 0.0%, ATT: 20.14 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [12078, 22236, 28344, 19900, 12214, 10524]
Line 2: [3406, 9088, 15642, 25902, 27262, 30146, 25220, 19280, 27636, 19614, 11806, 8606]
Line 3: [574, 1410, 4570, 11468, 9118, 6944, 21816, 11876, 11206, 9186, 7874, 4957, 7320]
Line 4: [29194, 19332, 22050, 21586, 19004, 16678, 9490, 3570]
Line 5: [3924, 8610, 14200, 27312, 33986, 37778, 33112, 28116, 22863, 20418]
Line 6: [2236, 5504, 7542, 19006, 20496, 26298, 17492, 13166, 11278, 8604, 5512, 1995]
Line 7: [1160, 1700, 9868, 23092, 28494, 37634, 7400, 2666, 3216, 4234, 4647, 7320]
Line 8: [574, 1410, 7104, 18064, 16922, 16132, 12638, 13518, 20304, 17388, 9398, 8340, 3766]
Line 9: [8164, 20424, 12786, 8824, 19614, 38564, 34808, 29036, 23688, 27344]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 24, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 9, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1500
Line 2: Route duration (m): 51, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 21, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1650
Line 3: Route duration (m): 51, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 4: Route duration (m): 37, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1650
Line 5: Route duration (m): 38, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 20, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
Line 6: Route duration (m): 49, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 18, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1500
Line 7: Route duration (m): 49, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 26, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100
Line 8: Route duration (m): 50, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 15, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 9: Route duration (m): 43, Frequency (veh/h): 14, No. of vehicles: 23, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 2100

Genetic algorithm data:

Population Size: 25, Elite Size: 8, No of iterations: 50

Objective function: $\min Z = \text{penalty1} * (8 * \text{score0}[\text{ATT}] * \text{dttotal} + 80 * \text{score0}[\text{dun}] * \text{dttotal}) + \text{penalty2} * \text{total_cost}$

Pswap (crossover rate): 0.1111111111111111, Pms (Small mod rate): 0.9, Pdel (Delete/Add node rate): 0.4, Penalty1 (% passenger cost): 0.8, Penalty2 (% electric bus cost): 0.5

Final Route Set:

Line 1: [28, 0, 12, 17, 22, 18, 13, 6, 15, 27, 7]
Line 2: [23, 14, 4, 7, 16, 6, 5]
Line 3: [4, 14, 24, 1, 9, 3, 11, 17, 28, 16, 27, 2, 29, 10, 21]
Line 4: [2, 10, 15, 21, 5, 6, 13, 18, 19, 17, 11]
Line 5: [3, 4, 20, 24, 1, 9, 14, 7, 27, 2, 29, 10]
Line 6: [14, 4, 20, 24, 23, 3, 11, 25, 28, 16, 27, 2, 29, 10, 7]
Line 7: [20, 23, 24, 4, 14, 7, 28, 16, 27, 2, 29, 10, 15]
Line 8: [4, 20, 24, 1, 9, 3, 11, 17, 19, 22, 25, 28, 16, 27, 2]
Line 9: [14, 11, 17, 12, 8, 26, 0, 22, 25, 28, 16, 15, 10]

All users' score:

d0: 51.92%, d1: 44.58%, d2: 3.51%, dun: 0.0%, ATT: 17.97 minutes

Bus passenger demand per link:

Line 1: [13266, 9768, 12350, 26590, 35886, 23610, 19680, 14876, 9900, 5548]
Line 2: [15640, 10826, 32678, 32026, 32380, 17668]
Line 3: [976, 9530, 460, 4582, 10638, 10468, 8354, 12594, 9912, 8924, 7128, 4608, 2441, 5104]
Line 4: [5452, 6140, 10268, 14956, 18230, 19410, 16392, 16938, 13362, 9230]
Line 5: [8826, 4358, 1612, 1792, 7774, 19346, 30150, 21584, 15892, 7874, 561]
Line 6: [4302, 5480, 1990, 3910, 11474, 11504, 15546, 11280, 8844, 7078, 5708, 3682, 561, 8010]
Line 7: [1160, 1130, 8266, 6380, 8858, 14596, 2388, 2958, 2728, 1866, 3211, 3568]
Line 8: [2878, 5462, 5842, 10172, 19158, 21128, 19980, 13422, 14076, 15500, 13646, 10112, 6842, 3704]
Line 9: [24344, 25600, 26794, 21052, 10114, 18338, 27592, 25232, 22814, 23240, 19222, 8160]

Bus information per line:

Line 1: Route duration (m): 43, Frequency (veh/h): 13, No. of vehicles: 21, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1950
Line 2: Route duration (m): 28, Frequency (veh/h): 12, No. of vehicles: 13, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1800
Line 3: Route duration (m): 59, Frequency (veh/h): 9, No. of vehicles: 20, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 720
Line 4: Route duration (m): 42, Frequency (veh/h): 7, No. of vehicles: 11, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1050
Line 5: Route duration (m): 46, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 19, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1650
Line 6: Route duration (m): 62, Frequency (veh/h): 11, No. of vehicles: 26, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 880
Line 7: Route duration (m): 49, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 18, Vehicle type: N, Max. Capacity (pas/h/link): 800
Line 8: Route duration (m): 54, Frequency (veh/h): 8, No. of vehicles: 16, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1200
Line 9: Route duration (m): 50, Frequency (veh/h): 10, No. of vehicles: 19, Vehicle type: A, Max. Capacity (pas/h/link): 1500
Final Cost per Line:

Line 1: Bus: 0, e-Bus: 7350000, Battery: 1512000
Line 2: Bus: 0, e-Bus: 4550000, Battery: 936000
Line 3: Bus: 0, e-Bus: 7000000, Battery: 1440000
Line 4: Bus: 0, e-Bus: 3850000, Battery: 792000
Line 5: Bus: 0, e-Bus: 6650000, Battery: 1368000
Line 6: Bus: 0, e-Bus: 9100000, Battery: 1872000
Line 7: Bus: 0, e-Bus: 6300000, Battery: 1296000
Line 8: Bus: 0, e-Bus: 5600000, Battery: 1152000
Line 9: Bus: 0, e-Bus: 6650000, Battery: 1368000

Number of Charging Stations:13,
Final Cost of Charging Stations:780000

Chargers List: {2, 3, 4, 5, 7, 10, 11, 14, 15, 20, 21, 23, 28}