



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

Διπλωματική εργασία:

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΣΤΙΚΩΝ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΓΙΑ  
ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΛΕΩΦΟΡΕΙΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ**

**Μπούσδρα Αικατερίνη**

**Επιβλέπων:**

Κεραπτσόγλου Κωνσταντίνος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2017



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



## Ευχαριστίες

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

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

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για τη συμπαράστασή και την υπομονή τους καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας αλλά και σε όλα τα φοιτητικά μου χρόνια.

Τέλος, ένα τεράστιο ευχαριστώ στο διαδικτυακό ιστότοπο «Κασετόφωνο» που με τις μουσικές του κασέτες με συντρόφευσε στα ξενύχτια για διάβασμα, τις πολύ πρωινές και απογευματινές ώρες καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.



Learning never exhausts the mind  
Leonardo da Vinci





## Περίληψη

**Τίτλος:** “Σχεδιασμός δικτύου αστικών συγκοινωνιών για ηλεκτρικά οχήματα σταθερής τροχιάς”

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί ο σχεδιασμός ενός δικτύου αστικών ηλεκτρικών λεωφορείων σταθερής τροχιάς. Σε αντίθεση με τις υπάρχουσες δημοσιευμένες εργασίες, λαμβάνει υπόψη τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των αστικών μέσων μεταφοράς και προτείνει ένα δυναμικό τρόπο φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων. Πρόκειται για σχεδιασμό δικτύου λεωφορείων σταθερής τροχιάς προωθώντας τη βιώσιμη κινητικότητα μεγιστοποιώντας την επιβατική ζήτηση ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιεί το επενδυτικό κόστος. Με δεδομένα εισόδου τον Πίνακα Προέλευσης – Προορισμού, προσχεδιασμένες τμηματικές λεωφορειακές γραμμές καθώς και τα χαρακτηριστικά του δικτύου (ανηφόρες δικτύου, αποστάσεις των σημείων ενδιαφέροντος ανά ζεύγος, κόστος τοποθέτησης πηνίων φόρτισης, κόστος κατασκευής νησίδας κτλ) πραγματοποιείται ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση του δικτύου. Το μοντέλο σχεδιασμού επιλέγει από ένα σύνολο προσχεδιασμένων τμηματικών γραμμών αυτές που θα συμπεριληφθούν στο δίκτυο. Η επιλογή και σύνδεση των γραμμών καθορίζεται από τον περιορισμό του συνολικού επενδυτικού κόστους (κόστος τοποθέτησης πηνίων και κόστος κατασκευής νησίδας παράλληλη στην πορεία της γραμμής) σε συνδυασμό με τον αριθμό των επιβατών που εξυπηρετούνται. Ύστερα από το σχεδιασμό του δικτύου ακολουθεί έλεγχος για την ανάγκη τοποθέτησης επιπλέον ηλεκτρικών πηνίων ώστε να εξυπηρετούνται οι ενεργειακές ανάγκες του δικτύου. Το μοντέλο εφαρμόζεται στο δίκτυο της Αθήνας ώστε να καταδειχθεί η εφαρμοσιμότητά του.

**Λέξεις κλειδιά:** ηλεκτρικά λεωφορεία, λεωφορεία σταθερής τροχιάς, δυναμική φόρτιση, σχεδιασμός δικτύου αστικών συγκοινωνιών, βιώσιμη κινητικότητα, μη γραμμικός αλγόριθμος



## **Abstract**

**Title:** “Rapid Transit Network Design for On-Line Electric Vehicles”

Electric vehicles (EVs) are inevitably environmental friendly and energy efficient alternatives compared to their thermal counterparts. However, dependency on battery capacity and extensive charging duration have hindered the widespread adoption of EVs. Recently, on-line electric vehicles (OLEVs) which exploit inductive charging and are able to charge wirelessly through electric coils embedded in the ground have emerged as an upgrade to regular EVs. This paper proposes the use of OLEVs in the context of Bus Rapid Transit systems, taking advantage of reduced charging times and the fixed-route structure of BRTs, which can permit the use of dedicated charging lanes. A mathematical model for efficient design of an OLEV network is presented and subsequently demonstrated for a case study in Athens, Greece.

**Keywords:** On-line electric vehicles (OLEV), Rapid Transit Network Design, Bus Rapid Transit (BRT), Urban Public Transport, Electric vehicles, sustainability, non-linear algorithm, inductive charging



## Εκτεταμένη περίληψη

Η μηχανοκίνητη κυκλοφορία είναι πλέον συνυφασμένη με αρνητικές επιπτώσεις στη βιωσιμότητα, που αφορούν την ατμοσφαιρική ρύπανση, την εξάντληση των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την κυκλοφοριακή συμφόρηση. Οι ανάγκες της σύγχρονης εποχής έχουν οδηγήσει στην αύξηση των αποστάσεων. Παρ' όλη τη βελτιωμένη απόδοση των σύγχρονων οχημάτων, ο αυξανόμενος αριθμός των ΙΧ έχει αυξήσει τα επίπεδα ρύπανσης στις αστικές περιοχές. Πλέον οι εκστρατείες μετρίασης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των μεταφορών έχουν ενθαρρύνει αρκετές βιομηχανίες οχημάτων να υιοθετήσουν τη τακτικές και τεχνολογίες εναλλακτικού καυσίμου. Πληθώρα αστικών συγκοινωνιών έχουν εισάγει στους στόλους τους οχήματα φυσικού αερίου. Ωστόσο, δεν εξαλείφεται η εκπομπή των καυσίμων, σε αντίθεση με τα ηλεκτρικά οχήματα τα οποία αποτελούν βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον επιλογή. Η αξιοποίηση της ηλεκτροκίνησης αποτελεί -διεθνώς αναγνωρισμένη- ελπιδοφόρα κατεύθυνση, αλλά παραμένει ακόμα πρακτικά ανεκμετάλλευτη. Η παρούσα έρευνα στοχεύει να καλύψει το τεχνικό και θεωρητικό κενό μέσω της ανάπτυξης ενός προτύπου σχεδιασμού δικτύου αστικών συγκοινωνιών με ηλεκτροκίνητο στόλο οχημάτων, μελετώντας την περίπτωση ενός υπαρκτού αστικού δικτύου.

Πρόσφατα, στη νότια Κορέα τέθηκαν σε λειτουργία για πρώτη φορά τα λεωφορεία επαγωγικής φόρτισης. Πρόκειται για τα ηλεκτρικά λεωφορεία σταθερής τροχιάς (OLEV, On – line electric vehicles) τα οποία φορτίζονται ασύρματα, εν κινήσει μέσω ηλεκτρικών πηνίων που τοποθετούνται στο έδαφος. Η συγκεκριμένη διαμόρφωση φόρτισης επιτρέπει στο όχημα να φορτίζει τις μπαταρίες του όσο κινείται, επεκτείνει την εμβέλεια του οχήματος, αλλά και μειώνει την ανάγκη στάσεων για επαναφόρτιση. Υπό αυτό το πρίσμα, κύριο θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί ο σχεδιασμός δικτύου λεωφορείων υψηλής στάθμης εξυπηρέτησης (Rapid Transit Network Design) προσθέτοντας την καινοτομία των OLEV. Η συγκεκριμένη έρευνα λοιπόν χρησιμοποιώντας κάποια από τα χαρακτηριστικά των λεωφορείων ταχείας τροχιάς (Bus Rapid Transit, BRT) καθώς παρουσιάζουν πληθώρα πλεονεκτημάτων, αναπτύσσει την ιδέα των OLEV τα οποία τα τοποθετεί σε αποκλειστικές λωρίδες κίνησης. Το προτεινόμενο μοντέλο επίλυσης του προβλήματος λαμβάνει υπόψη περιορισμούς κόστους, την εξυπηρέτηση της επιβατικής ζήτησης, τον αριθμό των στάσεων ανά γραμμή, τον αριθμό των συνολικών γραμμών του τελικού δικτύου καθώς και περιορισμούς ευθυγράμμισης. Η Αθήνα αποτελεί την περιοχή μελέτης της συγκεκριμένης έρευνας, αναπτύσσοντας ένα μοντέλο σχεδιασμού για αυτό το σκοπό.

Τα δεδομένα του προβλήματος αποτελούνται από τις υποψήφιες προσχεδιασμένες γραμμές, τον πίνακα προέλευσης – προορισμού, τα χαρακτηριστικά του δρόμου και το κόστος κατασκευής και τοποθέτησης πηνίων για τη κάθε γραμμή. Το συνολικό κόστος κατασκευής έκαστης γραμμής υπολογίζεται στο στάδιο προ – βελτιστοποίησης και εισάγεται ως δεδομένο στο μοντέλο. Εκτός από το σχεδιασμό του τελικού δικτύου, το μαθηματικό μοντέλο προσδιορίζει τους συνδέσμους όπου θα τοποθετηθούν τα ηλεκτρικά πηνία, υπολογίζοντας το σχετικό κόστος εγκατάστασης. Το αποτέλεσμα του μοντέλου είναι ένα δίκτυο  $k$  τελικών γραμμών οι οποίες αποτελούνται το πολύ από  $n$  σταθμούς εκάστη.

Το πρόβλημα διατυπώνεται ως μοντέλο ακέραιου προγραμματισμού με σκοπό τη μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Η συνάρτηση ορίζεται ως η διαφορά του

συνολικού επενδυτικού κόστους από τη συνολική επιβατική ζήτηση. Οι περιορισμοί που τέθηκαν είναι οι ακόλουθοι:

- I. Μήκος γραμμών: οι γραμμές του παραγόμενου δικτύου πρέπει να βρίσκονται εντός συγκεκριμένων ορίων, τα οποία ορίζονται από τον αριθμό των στάσεων που εξυπηρετεί η γραμμή.
- II. Ομοιότητα γραμμών: στο παραγόμενο δίκτυο δεν πρέπει να υπάρχουν γραμμές με ίδια αλληλουχία στάσεων, διότι η δημιουργία του δικτύου αποσκοπεί στην όσο το δυνατόν καλύτερη κάλυψη της περιοχής μελέτης.
- III. Ικανοποίηση επιβατικής ζήτησης: το παραγόμενο δίκτυο πρέπει να εξυπηρετεί όσο το δυνατό μεγαλύτερο αριθμό επιβατικής ζήτησης.
- IV. Περιορισμοί ευθυγράμμισης: κάθε γραμμή να ακολουθεί την ίδια πορεία από την αφετηρία στον τερματικό σταθμό και το αντίστροφο.
- V. Περιορισμοί τοποθέτησης πηνίων: εξασφαλίζουν την σωστή τοποθέτηση πηνίων τροφοδοσίας σε σημεία που κρίνεται απαραίτητο, βάσει των δεδομένων εισαγωγής.

Το μοντέλο σχεδιάστηκε και επιλύθηκε σε προγραμματιστικό φύλλο του MS Excel. Για τη δημιουργία του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε η επέκταση του excel Open Solver advanced version. Η εντολή αυτή απαιτεί τα ακόλουθα για το σχεδιασμό του μοντέλου:

- I. Εισαγωγή της αντικειμενικής συνάρτησης
- II. Καθορισμός των μεταβλητών απόφασης
- III. Καταγραφή των περιορισμών
- IV. Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου αποδεικνύουν ότι το μοντέλο παράγει λογικές διαδρομές. Παρ' όλα αυτά όμως, πρέπει να τονιστεί ότι τα αποτελέσματα θα ήταν καλύτερα σε μια εφαρμογή σε πραγματικό δίκτυο, όπου υπάρχει γνώση των πραγματικών τιμών κόστους, επιβατικής ζήτησης και λοιπών χαρακτηριστικών του δικτύου.

Η δομή της εργασίας είναι η ακόλουθη: Στο Κεφάλαιο 2, πραγματοποιείται μια σύντομη περιγραφή του προβλήματος και ύστερα η ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας. Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 3 παρατίθενται τα δεδομένα του προβλήματος και έπειτα διαμορφώνεται το μαθηματικό μοντέλο του. Ακολουθεί η διαδικασία επίλυσης και τα αποτελέσματα της μαζί με αξιολόγηση αυτών στο Κεφάλαιο 4. Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της έρευνας και προτείνονται μελλοντικές ερευνητικές επεκτάσεις του προβλήματος στο Κεφάλαιο 5.



## Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1. Το πρόβλημα σχεδιασμού δικτύου λεωφορείων ταχείας τροχιάς.....	1
1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας.....	2
1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας.....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....	5
2.1 Εισαγωγή.....	5
2.2 Σχεδιασμός δικτύου.....	6
2.2.1 Ορισμός .....	6
2.2.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	6
2.2.3 Συγκεντρωτικός πίνακας.....	9
2.3 Λεωφορεία ταχείας τροχιάς.....	11
2.3.1 Εισαγωγή.....	11
2.3.2 Τα κύρια χαρακτηριστικά των BRT.....	12
2.3.3 Λόγοι εφαρμογής.....	12
2.4 Ηλεκτρικά λεωφορεία σταθερής τροχιάς – Δυναμική φόρτιση(OLEV).....	14
2.4.1 Εισαγωγή.....	14
2.4.2 Η μπαταρία.....	15
2.4.3 Τα ηλεκτρικά πηνία.....	15
2.4.4 Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΕΠΙΛΥΣΗΣ .....	18
3.1 Το δίκτυο.....	19
3.1.1 Δεδομένα και συμβολισμοί.....	19
3.1.2 Μεταβλητές προβλήματος .....	19
3.1.3 Αντικειμενική συνάρτηση.....	20
3.1.4 Περιορισμοί.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	25
4.1 Ανάλυση της περιοχής – Οδικό Δίκτυο.....	25
4.2 Μετακινήσεις - Ζήτηση .....	25
4.2.1 Σύνολο μετακινούμενων .....	25
4.2.2 Κατασκευαστικό κόστος.....	26
4.3 Παραδοχές.....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΗ .....	29
5.1 Περιβάλλον επίλυσης .....	29



5.2 Αναλυτική παρουσίαση των βημάτων επίλυσης.....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	36
6.1 Επιλογή παραμέτρων.....	37
6.1.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων σεναρίου 1.....	37
6.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων σεναρίου 2:.....	38
6.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο σεναρίων .....	39
6.3 Έλεγχος ανάγκης επιπλέον εγκατάστασης πηνίων τροφοδοσίας.....	39
6.4 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων .....	41
6.5 Συμπεράσματα.....	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	44
7.1 Ανασκόπηση του προβλήματος.....	44
7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	45
7.2.1 Παραλλαγές στη διαμόρφωση του προβλήματος.....	45
7.2.2 Παραλλαγές στον αλγόριθμο επίλυσης.....	45
7.2.3 Προτάσεις για επέκταση του προβλήματος .....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	48



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1. Το πρόβλημα σχεδιασμού δικτύου λεωφορείων ταχείας τροχιάς

Οι αστικές συγκοινωνίες περιλαμβάνουν το δίκτυο των λεωφορειακών γραμμών, τα τρόλεϊ καθώς και τα μέσα σταθερής τροχιάς (μετρό, ηλεκτρικός και τραμ). Μέσα από πρωτοβουλίες και στόχους, προωθούνται δράσεις προς την κατεύθυνση της ανάπτυξης ενός μητροπολιτικού συστήματος συνδυασμένων δημοσίων συγκοινωνιών. Η ανάπτυξη καθώς και η συμπλήρωση του δικτύου δεν αφορά μόνο επεκτάσεις γραμμών (επίγειων και υπόγειων) αλλά και την ίδρυση δικτύων αποτελούμενα από “μέσα νέας γενιάς” που αποτελούν λύσεις του μέλλοντος. Τα τελευταία χρόνια παρουσιάζεται μία έντονη τάση αναζήτησης βέλτιστων τρόπων ικανοποίησης του επιβατικού κοινού των αστικών μέσων μαζικής μεταφοράς. Μια πληθώρα μελετητών ασχολείται με την εύρεση ευνοϊκών λύσεων προς το περιβάλλον.

Η δημόσια συγκοινωνία υπηρετεί έναν πολύ σημαντικό κοινωνικό ρόλο, ενώ σκοπός του σχεδιασμού είναι το χαμηλό επενδυτικό κόστος. Η αντικειμενική συνάρτηση σχεδιασμού θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη εκτός από το κόστος και την εξυπηρέτηση του επιβάτη. Πρακτικοί στόχοι σχεδιασμού σύμφωνα με τον Fielding (1987) είναι οι ακόλουθοι:

- Η μεγιστοποίηση της εξυπηρέτησης της ζήτησης
- Η ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας
- Η μεγιστοποίηση της συνολικής ευημερίας
- Η μεγιστοποίηση της χωρητικότητας
- Η διατήρηση της ενέργειας – λύσεις φιλικές προς το περιβάλλον
- Η βελτιστοποίηση προσωπικών παραμέτρων

Λαμβάνοντας όλα τα παραπάνω υπόψη, έγινε μια εκτενής έρευνα, προκειμένου να βρεθεί πιο είναι το πλέον κατάλληλο μέσο μεταφοράς που θα μπορέσει να καλύψει πολλούς από τους στόχους που έθεσε ο Fielding. Τα BRT παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα τα οποία λύνουν στοιχειώδη προβλήματα της σύγχρονης εποχής, όπως οι πολύωρες καθυστερήσεις στην κίνηση των μεγάλων αστικών κέντρων, δεν φαίνεται να αντιμετωπίζουν επιτακτικά ζητήματα. Συγκεκριμένα οι υψηλές συγκεντρώσεις αέριων ρύπων, οι οποίες συντελούν σε μεγάλο βαθμό στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και την έντονη κλιματική αλλαγή που βιώνουμε αποτελούν ίσως το μείζον θέμα της σύγχρονης εποχής. Επίσης, ένα δεύτερο μεγάλο ζήτημα σχετίζεται με την ενεργειακή κρίση λόγω της εξάντλησης των ορυκτών πόρων (πετρελαϊκές κρίσεις). Τα ηλεκτρικά λεωφορεία είναι πιο αποτελεσματικά από τα οχήματα diesel ή οχήματα που κινούνται με φυσικό αέριο. Η προσπάθεια απεξάρτησης από τους ορυκτούς πόρους είναι μεγάλη και η εγκατάσταση λεωφορείων που δεν συμβάλλουν σε αυτή φαντάζει ανώφελη. Η έντονη ανάγκη ικανοποίησης των δύο αυτών μεγάλων ζητημάτων, σύντομα θα επιφέρει την υποχρεωτική κατάργηση των μέσων που συμβάλλουν στην επιβάρυνση της κατάστασης. Η συνειδητοποίηση της ραγδαίας κλιματικής αλλαγής και η εξάντληση των ενεργειακών πόρων οδηγούν σε μονόδρομο, την ανεύρεση εναλλακτικών πηγών ενέργειας και σαφώς

ανανεώσιμων πηγών. Επιτάσσεται επομένως η κατασκευή/παραγωγή μέσω μαζικής μεταφοράς καθώς και μέσω μεταφοράς ιδιωτικής χρήσης με περιβαλλοντική συνείδηση.

Τελευταία οι προσπάθειες εντατικοποιούνται για μαζική παραγωγή ηλεκτρικών οχημάτων. Τα ηλεκτρικά οχήματα εξασφαλίζουν μηδενική εκτομή αερίων και αποδέσμευση από τη χρήση υγρών καυσίμων. Παρόλα αυτά βέβαια και η λύση αυτή δεν είναι ιδανική. Προς το παρόν η χρήση ηλεκτρικών οχημάτων είναι πράγματι σωτήρια, τι θα γίνει όμως όταν οι χρήστες τους αυξηθούν ραγδαία. Υπάρχουν υποδομές που μπορούν να στηρίξουν την ευρεία χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων. Η ανάγκη για φόρτιση θα είναι μεγάλη και χρονοβόρα όταν το αγοραστικό κοινό στραφεί σε αυτή τη λύση. Επίσης, ένα άλλο μεγάλο πρόβλημα της προκειμένης λύσης είναι ότι η χρήση των μπαταριών λιθίου που απαιτούν τα ηλεκτρικά οχήματα είναι δύσκολη για μεγάλη ζήτηση. Πρώτον, επειδή ως μπαταρίες είναι βαριές, ακριβές και με μικρή διάρκεια ζωής. Δεύτερον, γιατί η γη διαθέτει περίπου 10 εκατομμύρια τόνους λιθίου, που αντιστοιχεί σε μια μπαταρία συστήματος για κάθε όχημα που χρησιμοποιείται αυτή τη στιγμή, γεγονός που αποκλείει την ευρεία χρήση ηλεκτρικών οχημάτων με μπαταρίες λιθίου.

Πολλές πόλεις έχουν στραφεί σε μέσα μεταφοράς που κινούνται με ανανεώσιμες πηγές καυσίμων, αποφεύγοντας τη χρήση ορυκτών καυσίμων, καθώς δεν αποτελεί λύση του μέλλοντος. Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία ασχολείται με το σχεδιασμό δικτύου ηλεκτρικών λεωφορείων σταθερής τροχιάς τα οποία φορτίζονται εν κινήσει.

## **1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας**

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, θέτοντας ως στόχους την ελαχιστοποίηση του επενδυτικού κόστους και τη μεγιστοποίηση εξυπηρέτησης της ζήτησης, μέσα από περιορισμούς στοχεύει να βρει τη βέλτιστη διαμόρφωση των γραμμών. Το συγκεκριμένο δίκτυο βέβαια παρουσιάζει μια πρωτοτυπία, η οποία είναι η δυναμική φόρτιση των λεωφορείων, δηλαδή η φόρτισή τους κατά την κίνηση μέσω πηνίων που τοποθετούνται στο έδαφος. Μέχρι στιγμής η καινοτομία αυτή έχει υλοποιηθεί μόνο στο Campus Kaist, στη Νότια Κορέα από όπου προήλθε και η ιδέα. Στις μέχρι τώρα έρευνες που έχουν υλοποιηθεί λαμβάνεται υπόψη αποκλειστικά η στατική φόρτιση, αποτελώντας την μοναδική επιλογή παροχής ενέργειας για στόλους ηλεκτρικών λεωφορείων, με εξαίρεση την περίπτωση του Kaist. Όλες οι έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι στιγμής, αρκούνται στην απλή αναφορά της δυναμικής φόρτισης, χωρίς να υπάρχει καμία λεπτομερής ανάλυση αυτής και ένδειξη προτίμησης.

## **1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας**

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από τα εξής κεφάλαια:

**2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση:** Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο πραγματοποιείται εκτενής ανασκόπηση των σημαντικότερων μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί για το πρόβλημα σχεδιασμού δικτύων, των λεωφορείων ταχείας τροχιάς καθώς και των ηλεκτρικών οχημάτων σταθερής τροχιάς (OLEV). Πιο αναλυτικά, γίνεται αναφορά των μεθόδων επίλυσης, των αποτελεσμάτων που αποδίδουν και των παραμέτρων στους οποίους εστιάζει η κάθε έρευνα. Στο τέλος του κεφαλαίου, παρατίθενται ένας συγκεντρωτικός πίνακας παρουσίασης σημαντικών ερευνών κατά το πέρασμα του χρόνου. Ο πίνακας παρουσιάζει

στοιχεία όπως το έτος δημοσίευσης, ο μελετητής, η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε, οι παράμετροι που συμπεριλήφθηκαν στα μοντέλα καθώς και η αντικειμενική συνάρτησή τους. Ακόμη, πραγματοποιείται ανασκόπηση των εργασιών που αφορούν στο σχεδιασμό δικτύων, λεωφορείων ταχείας τροχιάς (BRT) καθώς και εργασιών που αφορούν τα ηλεκτρικά οχήματα σταθερής τροχιάς (OLEV). Αναλύεται η έννοια της δυναμικής φόρτισης, και παρουσιάζεται ο καινοτόμος τρόπος φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων.

**3. Διαμόρφωση μαθηματικού προτύπου:** Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, περιγράφεται το μαθηματικό πρότυπο, η αντικειμενική συνάρτηση καθώς και οι σχετικοί περιορισμοί. Παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι παράμετροι και οι περιορισμοί που του προβλήματος. Στο τέλος του κεφαλαίου περιγράφεται ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για την επίλυση του προβλήματος.

**4. Δεδομένα του προβλήματος:** Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρατίθενται πίνακες με τα δεδομένα του προβλήματος, και περιγράφονται τα απαραίτητα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης. Στα δεδομένα αυτά περιλαμβάνονται οι πίνακες Προέλευσης-Προορισμού, το κόστος της κάθε μικρής γραμμής, και τα χαρακτηριστικά του δικτύου.

**5. Εφαρμογή:** Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται το προγραμματιστικό περιβάλλον στο οποίο υλοποιήθηκε ο σχεδιασμός του μοντέλου.

**6. Αποτελέσματα:** Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση του προβλήματος και ακολουθεί η αξιολόγηση αυτών.

**7. Συμπεράσματα και Προτάσεις για μελλοντική έρευνα:** Το συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζει προτάσεις για μελλοντική εξέλιξη της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αναφέρονται μελλοντικοί στόχοι σχεδιασμού και πιθανές εναλλακτικές εκδοχές του μοντέλου που μπορούν να βελτιώσουν τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ**

### **2.1 Εισαγωγή**

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση του προβλήματος “Σχεδιασμός Δικτύου Διαδρομών Αστικών Συγκοινωνιών” (Transit Route Network Design Problem, TRNDP). Αρχικά, γίνεται μια εκτενής ανασκόπηση των κυριότερων μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί στο πρόβλημα του σχεδιασμού δικτύων αστικών συγκοινωνιών, όπου αναλύονται τα μοντέλα που έχουν χρησιμοποιηθεί και η μεθοδολογία επίλυσης τους. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται επιστημονικά άρθρα τα οποία αναλύουν τα χαρακτηριστικά των δικτύων λεωφορείων υψηλής στάθμης εξυπηρέτησης, για τα οποία πρόκειται να σχεδιαστεί το δίκτυο. Τέλος, γίνεται αναφορά στα επιστημονικά άρθρα που έχουν συνταχθεί και μελετούν τα ηλεκτρικά οχήματα σταθερής τροχιάς (on-line electric vehicles, OLEV), από τα οποία αντλήθηκε η τεχνολογία για τη δυναμική φόρτιση των οχημάτων (φόρτιση εν κινήσει).

Τα μέσα μαζικής μεταφοράς αποτελούν μια βιώσιμη επιλογή για μαζική μεταφορά σε αστικές ζώνες, προσφέροντας πλεονεκτήματα όπως κυκλοφοριακή αποσυμφόρηση, μείωση της ατμοσφαιρικής μόλυνσης και διατήρηση των ποσοστών της ενέργειας. Παρ’ όλα αυτά σε προηγούμενες δεκαετίες, παράγοντες όπως η κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη, η ανάγκη για προσωπική μετακίνηση, η αύξηση του ιδιωτικού οχήματος (IX) καθώς και η αστική εξάπλωση οδήγησε σε αύξηση της ζήτησης ως προς τα ιδιωτικά οχήματα, και μια μείωση στη χρήση των μέσων μαζικής μεταφοράς. (Sinha 2003; TRB 2001; EMTA 2004; ECMT 2002; Pucher et al. 2007). Προσπάθειες για ενδυνάμωση της δημόσιας συγκοινωνίας εστίασαν στη βελτίωση των υπηρεσιών που προσφέρει, υπηρεσίες όπως η χωρητικότητα της γραμμής, πυκνότητα των δρομολογίων, αξιοπιστία, άνεση, είναι μεταξύ των σημαντικότερων παραμέτρων για μια αποτελεσματικό δημόσιο σύστημα μεταφορών. (Sinha 2003; Vuchic 2004)

Η οργάνωση και ο σχεδιασμός ενός δημόσιου δικτύου μεταφορών το οποίο θα είναι οικονομικά αποδοτικό και θα εξυπηρετεί τους επιβάτες στο μέγιστο βαθμό είναι αναγκαίο για τη απόκτηση ενός καλού μεριδίου της αγοράς. Το πρόβλημα το οποίο περιγράφει το σχεδιασμό του δημόσιου δικτύου μεταφορών αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως Transit Route Network Design Problem (TRNDP). Εστιάζει στη βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία αντιπροσωπεύει την αποτελεσματικότητα του δικτύου κάτω από λειτουργικούς περιορισμούς, όπως ο αριθμός και το μήκος των γραμμών του δικτύου, τη συχνότητα των δρομολογίων, τον αριθμό των διαθέσιμων λεωφορείων και άλλα. (Chakroborty 2003; Fan and Machemehl 2006). Η πρακτική σημασία του σχεδιασμού δημόσιων δικτύων μεταφορών έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας. Πράγματι, έχουν αναπτυχθεί μια πληθώρα προσεγγίσεων και μοντέλων για το συγκεκριμένο πρόβλημα σε διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας σχεδιασμού και πολυπλοκότητας των διαμορφώσεων.

## 2.2 Σχεδιασμός δικτύου

### 2.2.1 Ορισμός

Ο σχεδιασμός των Μεταφορικών Συστημάτων αναφέρεται τόσο στα φυσικά αντικείμενα (υποδομές) που απαιτούν αναλυτική μελέτη και σχεδιασμό, όσο και σε μηχανισμούς που περιγράφουν τη λειτουργία και απόδοσή τους και συνδέονται με μη – φυσικά αντικείμενα, όπως εκείνα της ζήτησης και της συμπεριφοράς των χρηστών. Αποτελούνται από επιμέρους υπό – συστήματα που αλληλοεπηρεάζονται άμεσα ή έμμεσα, με γραμμικές ή μη – γραμμικές σχέσεις και αναδράσεις (Καρλαύτης και Σταθόπουλος, 2008).

Ο σχεδιασμός της διαδρομής καθοδηγείται από την κίνηση των επιβατών. Ιδρύονται γραμμές προκειμένου να παρέχουν μια άμεση ή έμμεση σύνδεση μεταξύ της ζώνης προέλευσης και της ζώνης προορισμού αντίστοιχα, όπως οι κατοικήσιμες περιοχές και οι περιοχές δραστηριοτήτων αντίστοιχα (Levinson, 1992). Το σχήμα των γραμμών είναι συχνά περιορισμένο από το μήκος, την άμεση σύνδεση των στάσεων, τη χρήση των δεδομένων δρόμων και την παράλληλη κάλυψη με τις άλλες γραμμές. Το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι ένα σύνολο γραμμών που συνδέουν διαφορετικές περιοχές μέσα στη ζώνη σχεδιασμού, προσαρμοσμένο στο δεδομένο δίκτυο.

Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες μεθόδων επίλυσης του προβλήματος σχεδιασμού είναι οι συμβατικές (conventional) και οι ευρετικές (heuristic) μέθοδοι (Κεπατσόγλου και Καρλαύτης, 2009). Στην πλειοψηφία των σχετικών εργασιών χρησιμοποιούνται ευρετικές μέθοδοι καθώς ανταποκρίνονται καλύτερα στη συνδυαστική φύση του προβλήματος (Israeli and Ceder, 1993) ενώ ταυτόχρονα η διατύπωση του προβλήματος μέσω μαθηματικού προγραμματισμού είναι δύσκολη (Chackroborty, 2003).

Αναλυτική βιβλιογραφική ανασκόπηση πραγματοποιείται στις εργασίες των Κεπατσόγλου και Καρλαύτης (2009) καθώς και Ceder και Wilson (1986). Οι μελέτες που έχουν δημοσιευτεί μέχρι και σήμερα παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία ως προς τη μεθοδολογία επίλυσής τους, τους στόχους που τίθενται μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης, τους περιορισμούς καθώς και την εφαρμογή τους σε πραγματικές περιπτώσεις. Στο υποκεφάλαιο που ακολουθεί θα παρουσιαστεί μια αναλυτική περίληψη των σημαντικών ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί στο πρόβλημα σχεδιασμού όλα αυτά τα χρόνια αλλά και ένας συγκεντρωτικός πίνακας μεθοδολογιών σημαντικών ερευνών που έχουν διεξαχθεί στο πρόβλημα σχεδιασμού δικτύων.

### 2.2.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Οι Laporte, et al. (2003), εφάρμοσαν ένα μοντέλο σχεδιασμού στην πόλη της Σεβίλλης, υπό τη θεώρηση ότι το πρόβλημα σχεδιασμού υπάγεται σε δύο υπόπροβλήματα: τον καθορισμό των γραμμών και των στάσεων. Αφού χωριστεί η περιοχή μελέτης σε ζώνες, εφαρμόζεται το μοντέλο των 4 βημάτων (4 stage transit planning model). Τα βήματα είναι τα ακόλουθα:



- Γένεση μετακινήσεων (Trip generation analysis)
- Κατανομή μετακινήσεων (Trip distribution analysis)
- Επιλογή μέσου (Modal choice analysis)
- Καταμερισμός στο δίκτυο (Trip assignment analysis)

Η ολοκλήρωση των 4 βημάτων οδηγεί στη δημιουργία ενός συνόλου πιθανών διαδρομών. Ο αριθμός των διαδρομών αυτών είναι μειωμένος, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται η χρήση μεθόδων βελτιστοποίησης (optimization methods). Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης βέβαια έχουν το πλεονέκτημα ότι επιτρέπουν ένα μεγαλύτερο αριθμό πιθανών διαδρομών σε σύγκριση με τη διαδικασία των 4 βημάτων. Οι διαδρομές δημιουργούν διαφορετικά σενάρια της πορείας της γραμμής. Η αντικειμενική συνάρτηση της συγκεκριμένης εφαρμογής είναι η μεγιστοποίηση της κάλυψης. Οι περιορισμοί αναφέρονται στο μήκος της γραμμής, το κόστος, την τοποθεσία και κατανομή των στάσεων, τα δρομολόγια. Δεδομένα αποτελούν ο πίνακας προέλευσης – προορισμού (πίνακας Π-Π) καθώς και το κόστος κάθε ζεύγους. Το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη το χρόνο των μετεπιβιβάσεων (transfer time).

Οι Kermanshahi, et al. (2015), επιχείρησαν μέσω της μελέτης τους να επιλέξουν εκείνες τις γραμμές από ένα σύνολο υποψήφιων γραμμών, οι οποίες θα μεγιστοποιούν την κάλυψη της ζήτησης, ικανοποιώντας ταυτόχρονα τον περιορισμό του επενδυτικού κόστους. Το κύριο επίτευγμα της συγκεκριμένης έρευνας ήταν ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος, καθώς το δίκτυο που εφαρμογής ήταν το μητροπολιτικό δίκτυο του Isfahan. Το πρόβλημα λύθηκε με μεθόδους βελτιστοποίησης, μιας και το δίκτυο είναι αρκετά μεγάλο. Ο αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος ακολουθούσε τα 4 στάδια:

- Δημιουργία διαδρομής (Route generation)
- Δέντρο αναζήτησης (Search tree)
- Αξιολόγηση της λύσης (Solution evaluation)
- Συμπέρασμα (Inference)

Η συγκεκριμένη έρευνα λαμβάνει υπόψη το χρόνο αναμονής και την “ποινή” της μετεπιβίβασης. Για την εύρεση της συντομότερης διαδρομής, έγινε χρήση του αλγορίθμου Floyd – Warshall (Ahuja et al. 1993). Το ίδιο πρόβλημα λύθηκε με διαφορετικό κάθε φορά επενδυτικό κόστος (4 διαφορετικά επενδυτικά κόστη). Το αξιοσημείωτο του συγκεκριμένου αλγορίθμου ήταν το μεγάλης κλίμακας πρόβλημα και ο σύντομος χρόνος επίλυσής του, καταλήγοντας ότι ο ίδιος αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αντίστοιχες περιπτώσεις μεγάλων δικτύων. Τέλος, αποδείχθηκε με πραγματικά νούμερα και μεγέθη, ότι ο αποτελεσματικός σχεδιασμός δικτύων BRT μπορεί να αυξήσει το ποσοστό κάλυψης της ζήτησης κατά 10% με επενδυτικό κόστος 120 εκατομμύρια.

Οι Laporte, et al. (2007), πρότειναν ένα μοντέλο για το σχεδιασμό ενίσχυσης ενός δικτύου λεωφορείων υψηλής στάθμης εξυπηρέτησης . Το προτεινόμενο μοντέλο είναι περιορισμένο από τρία διαφορετικά είδη περιπτώσεων. Με τους συγκεκριμένους περιορισμούς προκύπτει ένα δίκτυο το οποίο παρέχει γενικές εναλλακτικές διαδρομές για δεδομένα ζεύγη προέλευσης προορισμού, . Ουσιαστικά πρόκειται για μια έρευνα η οποία

αποσκοπεί στο να αποδείξει ότι η εισαγωγή της αβεβαιότητας επηρεάζει το σχεδιασμό του δικτύου.

Οι G. Bruno, et al. (2000), κατασκεύασαν έναν απλό και αποτελεσματικό αλγόριθμο 2 φάσεων, ο οποίος σχεδιάζει την πορεία μιας γραμμής ταχείας τροχιάς. Εστίασαν την προσοχή τους στην κατασκευή μιας ρεαλιστικής και πιο ευέλικτης προσέγγισης, εξετάζοντας όλες τις πιθανές λύσεις που θα είχαν το χαμηλότερο κόστος. Η μέθοδος έγκειται στην αξιοπιστία του πίνακα προέλευσης – προορισμού, γεγονός που την καθιστά ακριβή ως διαδικασία. Σε αυτό το άρθρο παρουσιάζεται μια στρατηγική η οποία δημιουργεί και βελτιστοποιεί μια σειρά από πιθανές γραμμές. Όπως έπραξε και ο Dufourd, η αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου είναι η μεγιστοποίηση του συνολικού πληθυσμού που καλύπτεται από τη γραμμή.

Αυτή η προσέγγιση έχει νόημα, καθώς λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως το επίπεδο εισοδήματος, η ιδιοκτησία Ι.Χ. και άλλα (τα συγκεκριμένα στοιχεία εκμαιεύονται εύκολα από έρευνες και αναφορές). Κάθε κομμάτι πληθυσμού αντιστοιχεί σε ένα διάνυσμα συντεταγμένων θέσης (x,y). Η τοποθέτηση των στάσεων γίνεται υπό τον περιορισμό μιας μέγιστης και μιας ελάχιστης απόστασης μεταξύ διαδοχικών στάσεων. Η ευρετική μέθοδος που προτείνει το άρθρο για το πρόβλημα της μιας γραμμής αποτελείται από δύο στάδια:

- Κατασκευή μιας αρχικής γραμμής
- Βελτίωση της λύσης

Σε σύγκριση με την προσέγγιση του Dufourd, η συγκεκριμένη μέθοδος είναι γρηγορότερη και δεν είναι εύκολο να κολλήσει σε επίπεδο τοπικής βελτιστοποίησης. Ο αλγόριθμος είχε εφαρμογή στην πόλη του Μιλάνου.

Οι G. Laporte, et al. δημοσίευσαν ένα άρθρο το οποίο περιγράφει διάφορες ευρετικές μεθόδους (heuristics methods) για το σχεδιασμό μιας γραμμής υψηλής στάθμης εξυπηρέτησης (rapid transit alignment). Ως πεδίο εφαρμογής χρησιμοποιήθηκε η πόλη της Σεβίλλης, από την οποία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για την κατασκευή των σεναρίων. Όπως και στις προηγούμενες μελέτες, έτσι και σε αυτή το πρόβλημα του σχεδιασμού διαιρείται σε δύο υποπροβλήματα: τον καθορισμό της πορείας της γραμμής (determining an alignment) και την τοποθέτηση των στάσεων. Η αντικειμενική συνάρτηση της μελέτης αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση της κάλυψης της ζήτησης. Δύο προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται για τη λύση του προβλήματος. Η πρώτη τοποθετεί τους κύριους σταθμούς και στη συνέχεια καθορίζει την πορεία της γραμμής με την τοποθέτηση των υπόλοιπων στάσεων (επέκταση του μετρό της Λισαβόνα, 1993). Στην δεύτερη προσέγγιση, η πορεία της γραμμής είναι αυτή που καθορίζεται πρώτα και στη συνέχεια τοποθετούνται οι στάσεις (κατασκευή του μετρό της Σεβίλλης). Και στις δύο προσεγγίσεις το επίπεδο της ζήτησης προβλέπεται από το μοντέλο των 4 βημάτων (trip attraction and generation, trip distribution, mode choice, and assignment). Σύμφωνα με το επιστημονικό άρθρο, υπάρχουν τρεις προσεγγίσεις για τη μέτρηση της κάλυψης μιας

γραμμής. Η πρώτη αποτελείται από το σχεδιασμό ενσωματωμένων διαδρόμων (drawing embedded corridors) γύρω από την πορεία της γραμμής.

Στη δεύτερη προσέγγιση χρησιμοποιούνται κωνοκεντρικά σχήματα (Dufourd, Gendreau και Laporte, 1996 και Bruno, Gendreau, και Laporte, 2002) τα οποία έχουν παρουσιαστεί στο προηγούμενο επιστημονικό άρθρο. Η Τρίτη προσέγγιση βασίζεται στον πίνακα προέλευσης – προορισμού και χαρακτηρίζεται ως η πιο κατάλληλη για την κατασκευή μοντέλου σχεδιασμού δικτύου καθώς βασίζεται σε πιο ρεαλιστικές υποθέσεις. Ο όγκος των δεδομένων που απαιτεί σαν μέθοδος είναι μεγάλος, παρ' όλα αυτά τα δεδομένα βρίσκονται εύκολα από έρευνες που πραγματοποιούνται κατά καιρούς. Το άρθρο στοχεύει στη δημιουργία μεθοδολογίας τοποθέτησης γραμμής που θα βασίζεται στην Τρίτη προσέγγιση η οποία θα χρησιμοποιεί τα τρία πρώτα στάδια από το μοντέλο των 4 βημάτων. Εκτιμάται αρχικά η ζήτηση που εξυπηρετεί ο κάθε σταθμός με το μοντέλο των Laporte, Mesa, and Ortega (2002). Το άρθρο παρουσιάζει 2 κατασκευαστικές ευρετικές μεθόδους (constructive heuristics) και μια διαδικασία βελτιστοποίησης (post – optimization procedure). Η πρώτη προσέγγιση (Greedy extension of an alignment) εμφανίζεται ως άπληστος αλγόριθμος (greedy algorithm) καθώς η πιο πιθανή απόφαση παίρνεται σε κάθε στάδιο χωρίς να λαμβάνει υπόψη την προηγούμενη απόφαση. Η δεύτερη προσέγγιση (Extension of an alignment through greedy insertions) έχει ως βασική ιδέα τον αρχικό σχεδιασμό μιας λύσης και στη συνέχεια την επιτυχή εισαγωγή περισσότερων σταθμών. Για τη δεύτερη προσέγγιση, πραγματοποιείται μια επιπλέον διαδικασία βελτιστοποίησης (Post-optimization procedure).

### 2.2.3 Συγκεντρωτικός πίνακας

Στον πίνακα 2.1 που ακολουθεί καταγράφονται οι μέθοδοι, οι παράμετροι και οι περιορισμοί από ένα εύρος μελετών που έχουν δημοσιευτεί από το 1925 μέχρι και το 2010. Πρόκειται για έναν συγκεντρωτικό πίνακα που παρουσιάζει τις έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί στο πρόβλημα του σχεδιασμού δικτύων.

Τα στοιχεία που παρουσιάζονται είναι τα ακόλουθα:

- I. Ημερομηνία δημοσίευσης
- II. Αναφορά στον μελετητή
- III. Περιορισμοί
- IV. Μεταβλητές απόφασης
- V. Μεθοδολογία

Έτος	Συγγραφείς	Περιορισμοί	Μεταβλητές απόφασης	Μεθοδολογία
1925	Patz	Χωρητικότητα λεωφορείου Ζήτηση	Ελάχιστος αριθμός άδειων θέσεων	Ευρετική
1977	Sonntag	Περιορισμένος αριθμός γραμμών	Ελάχιστος χρόνος ταξιδιού Ελάχιστος αριθμός δρομολογίων	Ευρετική
1980	Mandl	Συχνότητα Κάλυψη περιοχής	Ελάχιστος χρόνος ταξιδιού Μέγιστη αμεσότητα γραμμής	Ευρετική
1992	Pape et al.	Κάλυψη περιοχής	Ελάχιστος αριθμός γραμμών Μέγιστος αριθμός άμεσων επιβατών	Ευρετική
2002	Chaokroborty and Dwivedi	Διαδρομή	Ελάχιστος χρόνος ταξιδιού Μέγιστη εξυπηρέτηση της ζήτησης	Γενετικός αλγόριθμος
2003	Zhao and Gan	Προκαθορισμένες γραμμές Αριθμός γραμμών και στάσεων Μήκος γραμμής	Ελάχιστος αριθμός δρομολογίων Μέγιστη αμεσότητα γραμμών Μέγιστη κάλυψη της περιοχής	Αθροιστικός γενετικός αλγόριθμος
2004	Zhao and Ubaka	Μήκος γραμμής Αμεσότητα γραμμής	Ελάχιστος αριθμός δρομολογίων  Μέγιστη αμεσότητα γραμμών  Μέγιστη κάλυψη της περιοχής	Greedy Search, Fast Hill Climb Search

Έτος	Συγγραφείς	Περιορισμοί	Μεταβλητές απόφασης	Μεθοδολογία
2005	Yu et al.	Μήκος γραμμής Αριθμός μεταφορών	Ελάχιστος αριθμός δρομολογίων	Parallel Ant Colony
2006	Guan et al.	Αριθμός μεταφορών Μήκος γραμμής	Ελάχιστο μήκος διαδρομής Ελάχιστες μετεπιβιβάσεις Ελάχιστο μήκος ταξιδιού	Μαθηματική
2006	Zhao and Zeng	Κόστος Μήκος γραμμής Αριθμός διαδρομών	Ελάχιστος αριθμός δρομολογίων Μέγιστη εξυπηρέτηση	Υβριδική μεταευρετική
2007	Barra et al.	Εξυπηρέτηση ζήτησης Κόστος	Ελάχιστο μήκος διαδρομής	Μαθηματική
2007	Yang et al.	Μήκος διαδρομής	Ελάχιστες μετεπιβιβάσεις	Parallel Ant Colony
2009	Mauttone and Urquhart	Εξυπηρέτηση ζήτησης	Ελάχιστος αριθμός γραμμών Ελάχιστος χρόνος ταξιδιού	Ευρετική
2010	Fan and Mumford	Αριθμός γραμμών	Ελάχιστος χρόνος ταξιδιού Ελάχιστος αριθμός δρομολογίων	Hill-Climbing, Simulated Annealing

Πίνακας 2.1: Συγκεντρωτικός πίνακας του προβλήματος σχεδιασμού

### **2.3 Λεωφορεία ταχείας τροχιάς**

#### **2.3.1 Εισαγωγή**

Οι σύγχρονες ανάγκες για περιορισμό των ορυκτών ρύπων επιτάσσουν τη στροφή σε πιο φιλικά προς το περιβάλλον μέσα μαζικής μεταφοράς. Τα τελευταία χρόνια τα δίκτυα λεωφορείων (Bus Rapid Transit, BRT) εφαρμόζονται όλο και πιο συχνά σε μεγάλα αστικά κέντρα διεθνώς. Τα BRT σχεδιάστηκαν ως ένα μέσο που προσφέρει ποιότητα, σε επενδυτικό κόστος χαμηλότερο και αποδοτικότερο από αυτό άλλων μέσων. Η

συγκεκριμένη έρευνα ασχολείται με τη μελέτη σχεδιασμού ενός δικτύου ηλεκτρικών λεωφορείων ταχείας τροχιάς. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό που παρουσιάζει αυτό το δίκτυο, και θα το διαχωρίζει από τα ήδη υπάρχοντα δίκτυα λεωφορείων ταχείας τροχιάς, είναι η δυναμική φόρτιση των λεωφορείων.

Για αρχή κρίνεται σημαντικό να δοθεί μια λεπτομερής περιγραφή των λεωφορείων ταχείας τροχιάς και τι είναι αυτό που τα διαχωρίζει από τα κοινά λεωφορεία που υπάρχουν αυτή τη στιγμή στο δίκτυο της Αθήνας. Ο όρος που επικρατεί στη διεθνή βιβλιογραφία για το συγκεκριμένο είδος λεωφορείων είναι Bus Rapid Transit (BRT). Αυτός ο τύπος λεωφορείων έχει εγκατασταθεί σε πολλές χώρες, ενώ η πόλη Curitiba (Βραζιλία), ήταν η πρώτη που εγκατέστησε το καινοτόμο σύστημα των BRT οχημάτων. Τα BRT αποτελούν ένα υψηλής ποιότητας σύστημα λεωφορείων, το οποίο παρέχει γρήγορες, άνετες και με οικονομικά αποδοτικό τρόπο υπηρεσίες μεταφορών, οι οποίες συγκρίνονται σε χωρητικότητα με αυτές του μετρό. Όλα τα παραπάνω είναι αποτέλεσμα της κίνησης των οχημάτων σε αποκλειστική λωρίδα κυκλοφορίας, επιτρέποντας έτσι υψηλές ταχύτητες κίνησης και συχνότητες διέλευσης.

Τα χαρακτηριστικά των λεωφορείων ταχείας τροχιάς είναι όμοια με αυτά του ελαφρού σιδηρόδρομου ή του μετρό. Αυτό τα κάνει πιο αξιόπιστα, άνετα και γρηγορότερα από τα απλά λεωφορεία. Το πιο σημαντικό ίσως πλεονέκτημά τους παρέχει η αποκλειστική λωρίδα κυκλοφορίας, δίνοντας τη δυνατότητα να αποφεύγεται η συμφόρηση κατά τις ώρες αιχμής. Ο Jaime Lerner, χαρακτηρίζει τα συστήματα αυτά ως επίγεια μετρό, ένα υψηλής ποιότητας λεωφορείο με χαρακτηριστικά όμοια με του μετρό, αλλά με χαμηλότερο κόστος (Cervero, 1998).

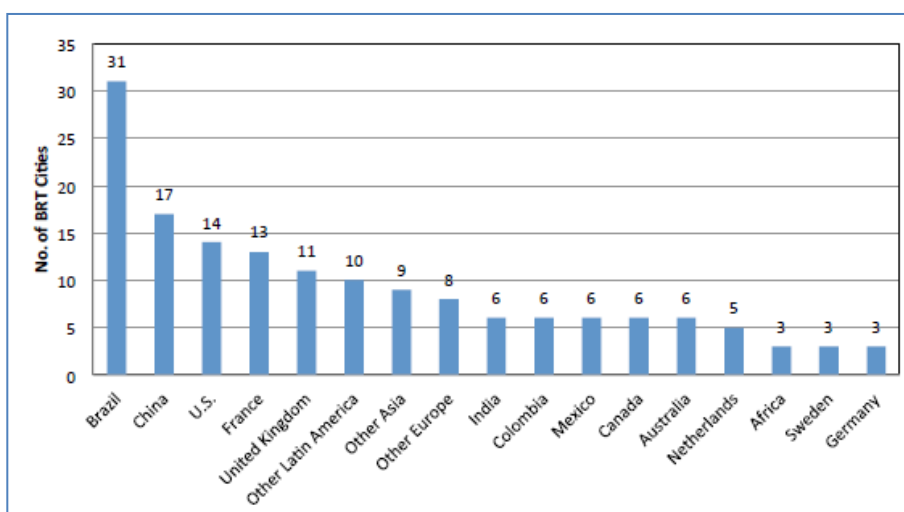
### 2.3.2 Τα κύρια χαρακτηριστικά των BRT

Τα λεωφορεία ταχείας τροχιάς έχουν κάποια χαρακτηριστικά προκειμένου να χαρακτηρισθούν ως Bus Rapid Transit (BRT). Τα κύρια χαρακτηριστικά τους συμπεριλαμβάνουν αποκλειστική λωρίδα κυκλοφορίας, ελκυστικές στάσεις (attractive stations), εύκολα προς επιβίβαση οχήματα, εκτός του οχήματος συλλογή των κομιστρων καθώς και πυκνά δρομολόγια. Στην περίπτωση μας θα χρησιμοποιηθούν οι ήδη υπάρχουσες στάσεις που διαθέτει το δίκτυο των μέσων μαζικής μεταφοράς. Ο λόγος είναι η μείωση του επενδυτικού κόστους. Επίσης για να θεωρηθεί ως BRT, ο διάδρομος κυκλοφορίας του θα πρέπει να έχει τουλάχιστον 3 χιλιόμετρα αποκλειστικής λωρίδας

### 2.3.3 Λόγοι εφαρμογής

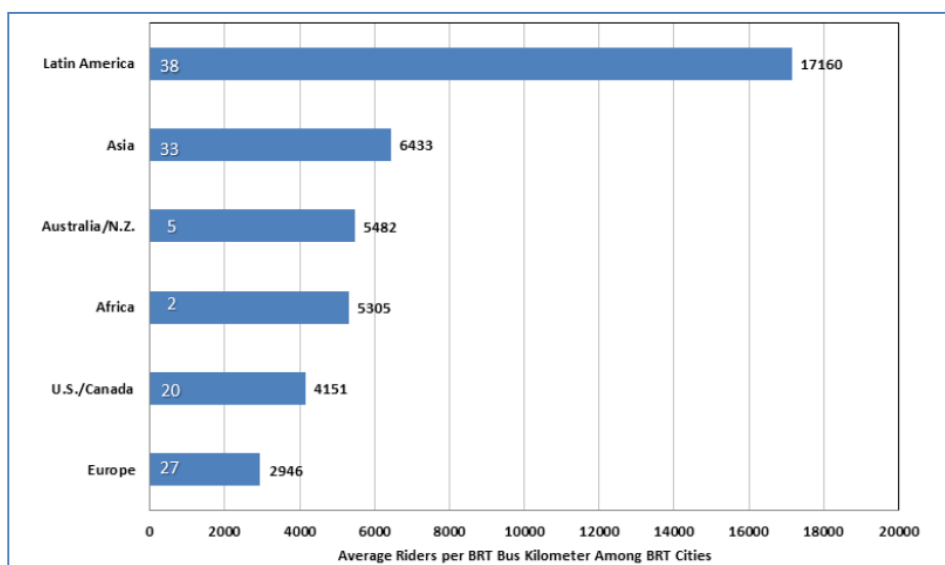
Οι λόγοι της εφαρμογής του BRT συστήματος σε σχέση με τα μέσα σταθερής τροχιάς είναι το χαμηλότερο κόστος εφαρμογής και η μεγαλύτερη ευελιξία λειτουργίας που παρουσιάζει. Συντελεί επίσης στην ανάπλαση της πόλης, ως εναλλακτικός τρόπος μετακίνησης. Συγκρίσεις με μέσα σταθερής τροχιάς έχουν δείξει ότι τα συστήματα λεωφορείων μπορούν να κατασκευαστούν στη μισή τιμή του κόστους των ελαφρών σιδηροδρόμων, και με 20% χαμηλότερο κόστος λειτουργίας (Ottawa, 1976). Επίσης

παρέχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα από τα κλασικά λεωφορεία, με αποτέλεσμα να εξυπηρετούν μεγαλύτερο αριθμό επιβατών και με πιο άνετο τρόπο. Επιπρόσθετα, διαθέτουν χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτά των ελαφρών σιδηροδρόμων (light rail system) είναι πιο αξιόπιστα, άνετα και γρήγορα σε σύγκριση με τα κοινά λεωφορεία. Ο Cervero (έτος) αξιολογεί στη μελέτη του το σχεδιασμό και τις εφαρμογές BRT συστημάτων σε παγκόσμια κλίμακα. Στο συγκεκριμένο άρθρο επισημαίνονται πόλεις και περιοχές με το πιο εκτεταμένο και προχωρημένο σύστημα. Σημειώνονται οι σχέσεις μεταξύ της πυκνότητας της πόλης και της αποτελεσματικότητας του κόστους. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται ο αριθμός των πόλεων που έχουν εγκαταστήσει BRT ανά χώρα (2013).



Εικόνα 2.1: Αριθμός πόλεων εγκατάστασης BRT ανά χώρα το έτος 2013

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται ο μέσος αριθμός χρηστών BRT ανά χιλιόμετρο σε πόλεις που το έχουν εγκαταστήσει.



Εικόνα 2.2: Μέσος αριθμός χρηστών BRT ανά χιλιόμετρο

Στη συνέχεια, ακολουθεί περιγραφή των χαρακτηριστικών του συστήματος BRT υποδομές, στάσεις, διάδρομοι κυκλοφορίας, οχήματα, σχεδιασμός δικτύου, πρόγραμμα διαδρομών, συλλογή – εκδοτήρια ναύλου, ταχύτητα λειτουργίας, άνεση, ασφάλεια, επενδυτικά κόστη και άλλα πολλά. Τέλος, γίνεται μια σύγκριση του κόστους επένδυσης του συστήματος BRT και άλλων μέσων, καθώς και μια γενικότερη σύγκριση μεταξύ των μέσων μαζικής μεταφοράς και τις επιπτώσεις που προκαλεί με την εγκατάστασή του το κάθε μέσο.

Το επιστημονικό άρθρο των Levinson, (2003), δίνει μια εκτενή περιγραφή της λειτουργίας του BRT, των τεχνικών χαρακτηριστικών του όπως (διαδρομή, στάσεις, οχήματα και πολλά άλλα), του κόστους και του οφέλους της εφαρμογής του.

## **2.4 Ηλεκτρικά λεωφορεία σταθερής τροχιάς – Δυναμική φόρτιση(OLEV)**

### **2.4.1 Εισαγωγή**

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο θα παρουσιαστεί η βιβλιογραφία για τα ηλεκτρικά οχήματα σταθερής τροχιάς (on – line electric vehicles, OLEV). Οι Suh, et al. παρουσιάζουν την πρωτοποριακή τεχνολογία των ηλεκτρικών οχημάτων σταθερής τροχιάς, τα οποία αναπτύσσονται στην πόλη Kaist της Κορέα. Τα συγκεκριμένα οχήματα συλλέγουν με ασύρματο τρόπο, ηλεκτρική ενέργεια από τα τοποθετημένα στο έδαφος πηνία. Στο επιστημονικό αυτό άρθρο παρουσιάζονται λεπτομερώς οι λειτουργικές απαιτήσεις και οι παράμετροι σχεδιασμού για την εξασφάλιση της σωστής και συνεχούς λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων αυτού του είδους. Κάνοντας ειδική αναφορά στα ηλεκτρικά λεωφορεία σταθερής τροχιάς αναλύεται η απόσταση που θα πρέπει να έχει το εξάρτημα που συλλέγει την ενέργεια από το έδαφος, στο οποίο είναι τοποθετημένο το πηνίο, με απώτερο σκοπό το μέγιστο δυνατό ποσοστό αποδοτικότητας. Τονίζεται ότι η τοποθέτηση των πηνίων δεν είναι απαραίτητη καθ' όλη τη διάρκεια της διαδρομής υπολογίζοντας την αυτονομία της μπαταρίας σε χιλιόμετρα, καθώς και τις καλύτερες πιθανές θέσεις τοποθέτησης των πηνίων.

Η επόμενη εναλλακτική αποτελεί η χρήση ηλεκτρικών οχημάτων που τραβούν ενέργεια από πηνία που έχουν τοποθετηθεί στο έδαφος, χωρίς να χρησιμοποιείται κάποια επαφή μεταξύ των πηνίων και των οχημάτων. Η φόρτιση είναι δυναμική, τα λεωφορεία φορτίζονται εν κινήσει μέσω της ασύρματης μετάδοσης της ηλεκτρικής ισχύς. Η συγκεκριμένη λύση έχει εφαρμοστεί προς το παρόν μόνο στην Νότια Κορέα και το συγκεκριμένο είδος ηλεκτρικών λεωφορείων καλείται On – Line Electric Vehicles (OLEV). Η μέγιστη αποδοτικότητα της ενέργειας φτάνει το ποσοστό του 80% σε μια απόσταση 18cm από το έδαφος. Στο συγκεκριμένο τύπο ηλεκτρικών λεωφορείων, τοποθετείται μια μικρή μπαταρία, η οποία καθιστά εφικτή την κίνηση του οχήματος σε αποστάσεις που δεν υπάρχουν πηνία στο έδαφος. Η ισχύς που μεταδίδεται από τα πηνία εκτός της χρήσης της για τη κίνηση του οχήματος, χρησιμοποιείται παράλληλα και για τη φόρτιση των μπαταριών. Ως αποτέλεσμα, να μην απαιτούνται επιπλέον εγκατάσταση σταθμών φόρτισης της μπαταρίας, οι οποίοι αποτελούν ένα μεγάλο έξοδο. Όπως γίνεται



εύκολα αντιληπτό, το κόστος κατασκευής, εγκατάστασης και συντήρησης των OLEV είναι από κάθε οπτική μικρότερο από αυτό των ηλεκτρικών οχημάτων.

#### 2.4.2 Η μπαταρία

Το κόστος των μπαταριών στα ηλεκτρικά λεωφορεία είναι μεγάλο και το βάρος τους αρκετά μεγάλο. Ο χρόνος που απαιτείται για τη φόρτιση είναι πολύς, και το κόστος κατασκευής του σταθμού φόρτισης μεγάλο. Η ποσότητα λιθίου στη γη είναι περιορισμένη, συγκεκριμένα φτάνει στα 10 εκατομμύρια τόνους λιθίου τα οποία είναι αρκετά για να εξασφαλίσουν μια μπαταρία λιθίου για κάθε αυτοκίνητο που υπάρχει αυτή τη στιγμή στον πλανήτη.

Τα OLEV χρησιμοποιούν μικρές βοηθητικές μπαταρίες για προώθηση του οχήματος σε αποστάσεις όπου δεν έχουν εγκατασταθεί πηνία στο έδαφος. Επίσης όταν υπάρχει ανάγκη, έχουμε ταυτόχρονη χρήση μπαταρίας και ηλεκτρικών πηνίων για προώθηση του λεωφορείου. Συνήθως αυτό συμβαίνει σε σημεία που έχουμε ανηφόρες, ή το λεωφορείο είναι γεμάτο. Το OLEV είναι σχεδιασμένο να έλκει 60kw ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν απαιτείται μεγαλύτερη ώθηση για επιτάχυνση ή οτιδήποτε άλλο, τραβάει συμπληρωματική ενέργεια ταυτόχρονα από την μπαταρία, η οποία τροφοδοτείται με ενέργεια όταν δεν χρησιμοποιείται και έχει χαμηλά επίπεδα ενέργειας.

#### 2.4.3 Τα ηλεκτρικά πηνία

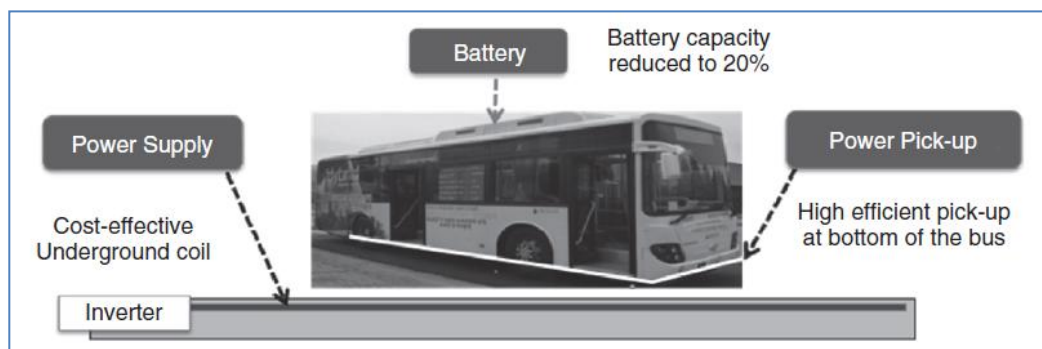
Ο σχεδιασμός των πηνίων στο έδαφος αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες του συστήματος OLEV. Έχουν σχεδιαστεί πολλοί διαφορετικές εκδοχές. Η τοποθέτησή τους δεν είναι απαραίτητη σε όλο το δίκτυο της λεωφορειογραμμής, καθώς η μπαταρία χρησιμοποιείται ως πηγή ενέργειας όπου δεν υπάρχουν πηνία. Η αυτονομία που παρουσιάζει η μπαταρία που εγκαθίσταται στο OLEV είναι της τάξεως των 10 χιλιομέτρων. Η διαδρομή που ακολουθούν τα λεωφορεία είναι προκαθορισμένη και σε αποκλειστική λωρίδα κυκλοφορίας. Αυτό καθιστά σχετικά εύκολη τη μελέτη τοποθέτησης των πηνίων. Ενδεικνύται η εγκατάστασή τους σε στάσεις της γραμμής, σε διασταυρώσεις φαναριών καθώς και σε κρίσιμα σημεία της διαδρομής που απαιτείται μεγαλύτερη ώθηση για την κίνηση του λεωφορείου. Στο χρόνο που το λεωφορείο αποβιβάζει και επιβιβάζει επιβάτες, η μπαταρία του φορτίζεται με αποτέλεσμα να είναι εφικτό να φτάσει μέχρι την επόμενη στάση.

#### 2.4.4 Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο

Μέσα στο OLEV, το επίπεδο του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που δημιουργείται είναι αμελητέο, φτάνει την εμβέλεια των 1 - 20 mG βάσει της θέσης. Μεταξύ της περιοχής ακριβώς από κάτω από το όχημα και του δρόμου, η οποία δεν είναι προσβάσιμη στους επιβάτες, το επίπεδο του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ξεπερνάει το επιτρεπόμενο όριο. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο των πηνίων ενεργοποιείται τη στιγμή που το όχημα περνάει από

πάνω τους. Όταν περνάνε οχήματα τα οποία δεν διαθέτουν το συλλέκτη ενέργειας που διαθέτουν τα OLEV, τα πηνία παραμένουν απενεργοποιημένα.

Το διάγραμμα διάταξης των εξαρτημάτων φόρτισης του οχήματος έχει την ακόλουθη μορφή:



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα διάταξης των εξαρτημάτων φόρτισης της μπαταρίας

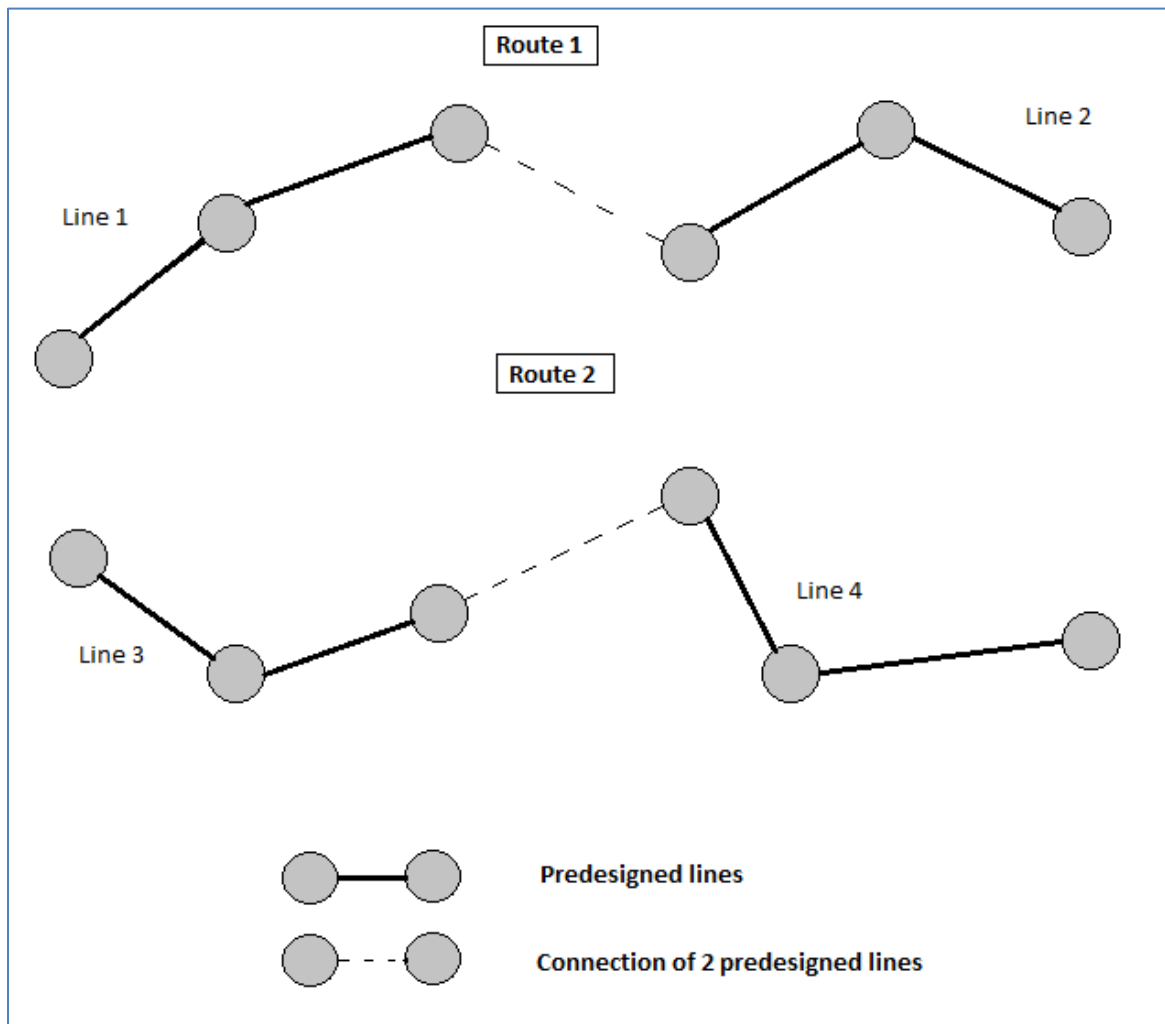
Η επισυναπτόμενη εικόνα παρουσιάζει τα απαραίτητα εξαρτήματα που απαιτείται να έχει το ηλεκτρικό όχημα για τη συλλογή της ηλεκτρικής ενέργειας. Το όχημα θα πρέπει να διαθέτει μπαταρία, της οποίας η χωρητικότητα είναι μειωμένη κατά 20% από αυτές που χρησιμοποιούν τα συμβατικά ηλεκτρικά οχήματα. Η μπαταρία χρησιμοποιείται σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν πηνία στο έδαφος και εξασφαλίζει την ανεξάρτητη μετακίνηση του οχήματος. Επιπλέον, στο κάτω μέρος του οχήματος εγκαθίστανται ένα εξάρτημα συλλογής ενέργειας, μέσω του οποίου εκμαιεύεται και η ηλεκτρική ενέργεια από τα πηνία.

Επιπρόσθετα, στο συγκεκριμένο άρθρο γίνεται αναφορά στο κόστος της συγκεκριμένης τεχνολογίας συγκριτικά με τις εναλλακτικές που είναι αυτή τη στιγμή σε λειτουργία. Τέλος, πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των OLEV και των επαναφορτιζόμενων οχημάτων που απαιτούν σύνδεση για τη φόρτισή τους.



### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Το πρόβλημα προσεγγίζεται με τη μέθοδο του μη γραμμικού, ακέραιου αλγορίθμου, καθώς επρόκειτο για πρόβλημα βελτιστοποίησης δικτύου. Αναζητείται εκείνη η λύση η οποία μεγιστοποιεί τη αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Προκειμένου να χαραχθεί η βέλτιστη διαδρομή που θα ακολουθήσει το επιβατικό όχημα ορίζεται η αντικειμενική συνάρτηση. Οι παράμετροι της αντικειμενικής συνάρτησης είναι η ελαχιστοποίηση του επενδυτικού κόστους και η μεγιστοποίηση της εξυπηρέτησης της ζήτησης. Πέρα από τις παραμέτρους τίθενται και κάποιοι περιορισμοί οι οποίοι περιορίζουν αισθητά το εύρος των εναλλακτικών λύσεων, αποδίδοντας έτσι τη βέλτιστη λύση. Η επισυναπτόμενη εικόνα που ακολουθεί παραθέτει ένα σχέδιο που παρουσιάζει τον τρόπο που ενώνονται οι προσχεδιασμένες γραμμές, προκειμένου να αποδώσουν το τελικό δίκτυο σχεδιασμού. Το μοντέλο της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποίησε την ακόλουθη λογική:



Εικόνα 3.1: Σχεδιαστική απεικόνιση της λογικής σχεδιασμού και ένωσης των γραμμών

### 3.1 Το δίκτυο

#### 3.1.1 Δεδομένα και συμβολισμοί

Το δίκτυο αποτελείται από  $i$  σταθμούς. Το σύνολο  $A$  περιλαμβάνει τους  $i$  πιθανούς σταθμούς για την εγκατάσταση των στάσεων της έκαστης λεωφορειογραμμής  $i$ ,  $A = \{i:1,2,\dots,A\}$ . Οι διαδρομές πρόκειται να καλυφθούν από  $m$  λεωφορεία και ένα σύνολο  $l$  γραμμών  $L = \{l:1,2,\dots,l\}$  που θα ανήκουν στο δίκτυο. Το σύνολο των γραμμών είναι μικρό, αφού το επιβάλλει το κριτήριο του επενδυτικού κόστους το οποίο και εξαιρεί την επιλογή μερικών γραμμών από το τελικό δίκτυο. Στο δίκτυο εισάγονται  $s$  υποψήφιες γραμμές οι οποίες δημιουργούν το σύνολο  $S$ . Με την αφαίρεση κάποιων γραμμών από το σύνολο  $S$  το σύνολο  $L$ , το οποίο αποδίδει τις γραμμές που ανήκουν στο τελικό δίκτυο.

Έπειτα, για κάθε συνδυασμό σημείων υπάρχει ένα αντίστοιχο κόστος κατασκευής, το οποίο έχει ως παραμέτρους του το κόστος τοποθέτησης των πηνίων ανά μέτρο ( $C_c$ ) και το κόστος κατασκευής νησίδας ανά μέτρο ( $C_a$ ). Καθ' όλη τη διαδρομή μεταξύ δύο διαδοχικών στάσεων πρόκειται να κατασκευαστεί νησίδα για την εξασφάλιση της αποκλειστικής κυκλοφορίας των λεωφορείων. Τα πηνία θα τοποθετηθούν σε κάποια τμήματα της γραμμής που απαιτείται είτε φόρτιση των μπαταριών είτε επιπλέον ώθηση στο όχημα. Το συνολικό επενδυτικό κόστος που διατίθεται για το σχεδιασμό του δικτύου, συμβολίζεται με  $B$ . Το μοντέλο επιλέγει 12 μικρές γραμμές για το σχεδιασμό του τελικού δικτύου. Με αυτές τις γραμμές παράγει τις 6 τελικές γραμμές του δικτύου ύστερα από τη σύνδεσή τους ανά δύο. Η επιλογή και σύνδεση των γραμμών για την παραγωγή του τελικού δικτύου σχεδιασμού καθορίζεται από τους περιορισμούς και τους παραμέτρους που έχουν τεθεί από το μοντέλο. Μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της εξυπηρέτησης της επιβατικής ζήτησης ( $d_{ij}$ ) σε συνδυασμό με την ελάχιστη επένδυση ( $c_{ij}$ ). Η επιβατική ζήτηση μεταξύ δύο διαδοχικών σταθμών  $i, j$  συμβολίζεται με  $d_{ij}$ .

Προκειμένου το μοντέλο να έχει νόημα, πέρα από τα κριτήρια επιβάλλονται και τεχνικοί περιορισμοί οι οποίοι θα αναλυθούν λεπτομερώς σε παρακάτω υποκεφάλαιο.

#### 3.1.2 Μεταβλητές προβλήματος

Προτού αναφερθούν οι παράμετροι, κρίνεται χρήσιμο να γίνει αναφορά στις μεταβλητές που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση των μεταβλητών και πλήρης αιτιολόγηση των τιμών που λαμβάνει η κάθε μία ξεχωριστά.

$y_{ij}^s$ : λαμβάνει τις τιμές 0 και 1. Στην περίπτωση που ο σύνδεσμος μεταξύ δύο διαδοχικών σταθμών ανήκει στις υποψήφιες γραμμές που εισάγονται στο δίκτυο η τιμή είναι ίση με τη μονάδα, σε αντίθετη περίπτωση λαμβάνει την τιμή μηδέν.

$cs_{ij}$ : η τιμή λαμβάνει τις τιμές 0 και 1. Σε περίπτωση που το τόξο κρίνεται κρίσιμο (ανηφόρα, αφετηρία γραμμής ή τερματισμός) η τιμή είναι ίση με τη μονάδα, σε αντίθετη περίπτωση η τιμή είναι ίση με το μηδέν.

$x_{ij}$ : λαμβάνει τις τιμές 0 και 1. Στην περίπτωση που το τόξο  $ij$  ανήκει στο δίκτυο σχεδιασμού λαμβάνει την τιμή 1, διαφορετικά την τιμή 0.

$x_{ij}^1$ : λαμβάνει τις τιμές 0 και 1. Εάν το τόξο  $ij$  ανήκει σε μια γραμμή που συμπεριλαμβάνεται στο δίκτυο σχεδιασμού λαμβάνει τιμή ίση με τη μονάδα, διαφορετικά μηδέν.

$h_s^1$ : λαμβάνει τις τιμές 0 και 1. Στην περίπτωση που η προσχεδιασμένη γραμμή  $s \in S$  συμπεριλαμβάνεται στο τελικό δίκτυο σχεδιασμού  $L$ , λαμβάνει την τιμή 1, σε αντίθετη περίπτωση η τιμή της είναι μηδέν.

$h_{sk}$ : λαμβάνει τις τιμές 0 και 1. Στην περίπτωση που η προσχεδιασμένη γραμμή  $s$  συνδέεται με τη προσχεδιασμένη γραμμή  $k$ , τότε η τιμή λαμβάνει τιμή ίση με τη μονάδα, σε αντίθετη περίπτωση ίση με το μηδέν.

$td_{ij}$ : Το αποκλειστικό μήκος κάθε τόξου ( $td_{ij}$ ) προκύπτει από το σύνολο των επιμέρους μηκών που ενώνουν αυτά τα δύο σημεία (τα επιμέρους μήκη ακολουθούν τους επιτρεπτούς δρόμους του δικτύου για να φτάσουν από το ένα σημείο στο άλλο). Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σταθμών  $i,j$  δίνεται με το σύμβολο  $td_{ij}$  και αναφέρεται σε μέτρα. Το μήκος της έκαστης γραμμής σχεδιασμού προσδιορίζεται από το εύρος των  $l_{\min, \max}$ .

ML: Το μέγιστο φάσμα των OLEV αποδίδεται από την τιμή του.

MS: Ο μέγιστος αριθμός στάσεων που μπορεί να διαθέτει μια γραμμή καθορίζεται από την τιμή του.

Ο σκοπός του μοντέλου είναι να σχεδιάσει ένα δίκτυο το οποίο θα αποτελείται από ένα σύνολο γραμμών  $l$ . Οι πιθανές διαδρομές είναι αρκετές, αλλά τα κριτήρια και οι περιορισμοί που θα τεθούν θα οδηγήσουν στην οριστικοποίηση του δικτύου.

### 3.1.3 Αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται η διαφορά του επενδυτικού κόστους από την εξυπηρέτηση της ζήτησης. Στο επενδυτικό κόστος συνυπολογίζονται το κόστος τοποθέτησης πηνίων τροφοδοσίας καθώς και το κόστος κατασκευής νησίδας για την εξασφάλιση της αποκλειστικής κυκλοφορίας των οχημάτων του στόλου. Αποζητείται η ελαχιστοποίηση του επενδυτικού κόστους σε συνδυασμό με τη μεγιστοποίηση του εξυπηρέτησης της ζήτησης. Ακολούθως αναλύεται λεπτομερώς η σύνθεση της αντικειμενικής συνάρτησης που κάνει χρήση το μοντέλο επίλυσης του προβλήματος:

$$\max a \cdot p \cdot \sum_{i \in A} \sum_{j \in A} d_{ij} \sum_{l \in L} x_{ij}^l - b \cdot [ C_c \sum_{j \in A} \sum_{i \in A} k_{ij} td_{ij} + C_a \sum_{i \in A} \sum_{j \in A} td_{ij} x_{ij} ]$$

όπου,

$a \in [0,1]$ : η παράμετρος  $a$  λαμβάνει τιμές μεταξύ του μηδενός και της μονάδας. Πρόκειται για το βάρος που αντιστοιχεί στην εξυπηρέτηση της ζήτησης. Στην πρώτη περίπτωση στόχος είναι η μεγιστοποίηση της κάλυψης της ζήτησης, δίνοντας έμφαση σε

αυτό το μέγεθος. Στην αντίθετη περίπτωση, που η τιμή πλησιάζει τη μονάδα στόχος είναι η μεγιστοποίηση της κάλυψης της ζήτησης.

$b \in [0,1]$ : η συγκεκριμένη παράμετρος λαμβάνει τιμές μεταξύ του μηδενός και της μονάδας. Πρόκειται για το βάρος που αντιστοιχεί στο συνολικό κόστος που απαιτεί ο σχεδιασμός του δικτύου. Στην περίπτωση που η τιμή πλησιάζει τη μονάδα, σημαίνει ότι στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του επενδυτικού κόστους. Στην αντίθετη περίπτωση, που η τιμή πλησιάζει το μηδέν, αποδίδεται προτεραιότητα στην άλλη παράμετρο της αντικειμενικής συνάρτησης επιδιώκοντας τη μεγιστοποίηση της κάλυψης της ζήτησης.

Ουσιαστικά οι παράμετροι  $a, b$  αποτελούν τα βάρη που θα εφαρμοστούν σε κάθε κριτήριο. Ανάλογα με το ποιο κριτήριο θεωρείται πιο σημαντικό λαμβάνεται και η αντίστοιχη τιμή των παραμέτρων.

### 3.1.4 Περιορισμοί

Στο μοντέλο εισάγονται κάποιοι περιορισμοί οι οποίοι θα περιορίσουν το εύρος των πιθανών λύσεων για το σχεδιασμό των γραμμών του δικτύου. Λαμβάνουν υπόψη παραμέτρους σχετικά με το σχεδιασμό και τη λειτουργία του δικτύου. Οι περιορισμοί είναι οι ακόλουθοι:

#### **Περιορισμοί ελαχιστοποίησης του επενδυτικού κόστους:**

Περιορισμός 1, αναφέρεται στο συνολικό κόστος της κατασκευής.

$$C_c \sum_{i \in A} \sum_{j \in A} k_{ij} t_{ij} + C_a \sum_{i \in A} \sum_{j \in A} t_{ij} x_{ij} \leq B \quad (1)$$

#### **Περιορισμοί ευθυγράμμισης (Alignment location constraints)**

Περιορισμοί 2 & 3, εξασφαλίζουν ότι ένα τόξο συμπεριλαμβάνεται στο δίκτυο μόνο στην περίπτωση που το τόξο ανήκει σε κάποια προσχεδιασμένη γραμμή του δικτύου.

$$x_{ij}^l \leq y_{ij}^s \quad i, j \in A, i < j, l \in L, s \in S \quad (2)$$

$$x_{ij} \leq y_{ij}^s \quad i, j \in A, i < j, s \in S \quad (3)$$

Περιορισμός 4, εξαναγκάζει τη γραμμή να ακολουθεί την ίδια διαδρομή και από την αφετηρία προς τον τερματικό σταθμό αλλά και στην αντίθετη κατεύθυνση.

$$x_{ij}^l = x_{ji}^l \quad i, j \in A, i < j, \forall l \in L \quad (4)$$

Περιορισμοί 5 & 6, εξασφαλίζουν την κατασκευή ενός τόξου μόνο στην περίπτωση που χρησιμοποιείται από κάποια γραμμή του τελικού δικτύου που σχεδιάζεται.

$$x_{ij}^l \leq x_{ij} \quad i, j \in A, i < j, \forall l \in L \quad (5)$$

$$x_{ij}^l \leq \sum_{l \in L} x_{ij}^l \quad i, j \in A, i < j, \forall l \in L \quad (6)$$

Περιορισμός 7, εξαναγκάζει κάθε σταθμό να έχει το πολύ δύο συσχετισμένα άκρα σε κάθε γραμμή.

$$\sum_{j \in A} x_{ij}^l \leq 2 \quad i \in A, i < j, l \in L \quad (7)$$

Περιορισμός 8, δηλώνει ότι κάθε τόξο μπορεί να εμφανίζεται το πολύ σε δύο γραμμές του δικτύου σχεδιασμού.

$$\sum_{l \in L} x_{ij}^l \leq 2 \quad i, j \in A, i < j \quad (8)$$

Περιορισμοί 9 & 10, Οι περιορισμοί 9 και 10 επιτρέπουν τη σύνδεση δύο προσχεδιασμένων γραμμών για τη δημιουργία μιας τελικής λεωφορειογραμμής, μόνο στην περίπτωση που οι δύο αυτές γραμμές έχουν επιλεγεί στον τελικό σχεδιασμό του δικτύου.

$$h_{sk} \leq h_s^l \quad \forall s, k \in S, l \in L \quad (9)$$

$$h_{sk} \leq h_k^l \quad \forall s, k \in S, l \in L \quad (10)$$

Περιορισμός 11, προσδιορίζει τον αριθμό των προσχεδιασμένων γραμμών που μπορούν να ενωθούν για τη δημιουργία μιας τελικής γραμμής του δικτύου.

$$\sum_{l \in L} \sum_{s \in S} h_s^l \leq 2 \cdot ML \quad (11)$$

Περιορισμός 12, εξασφαλίζει ότι ένα τόξο συμπεριλαμβάνεται στη γραμμή  $l$ , μόνο στην περίπτωση που η προσχεδιασμένη γραμμή  $s$  είναι επιλεγμένη στο δίκτυο σχεδιασμού.

$$h_s^l \cdot y_{ij}^s = x_{ij}^l \quad i, j \in A, i < j, l \in L, s \in S \quad (12)$$



Περιορισμός 13, ορίζει την τιμή της μεταβλητής απόφασης  $h$ .

$$h_{sk} = h_s^l \cdot h_k^l \quad i, j, p \in A, i < j, j < p, l \in L, s, k \in S \quad (13)$$

Περιορισμός 14, εξασφαλίζει τη μη επικάλυψη δύο προσχεδιασμένων γραμμών.

$$y_{ij}^s \neq y_{ij}^k \quad \forall i, j \in A, i < j, s, k \in S \quad (14)$$

Περιορισμός 15, εξασφαλίζει το μέγιστο αριθμό γραμμών ανά λεωφορειογραμμή που συμπεριλαμβάνεται στο τελικό δίκτυο σχεδιασμού.

$$1 + \sum_{i \in A} \sum_{j \in A} x_{ij}^l \leq MS \quad \forall l \in L \quad (15)$$

Περιορισμός 16, εξασφαλίζει ότι ένα πηνίο τοποθετείται μόνο σε περίπτωση που το κρίσιμο τόξο (ανηφόρα, αφετηρία, τερματικός σταθμός) συμπεριλαμβάνεται στο δίκτυο σχεδιασμού.

$$k_{ij} = x_{ij} \cdot cs_{ij} \quad i, j \in A, i < j \quad (16)$$

Περιορισμός 17, ορίζει το μέγιστο μήκος γραμμής που μπορεί να δημιουργηθεί από την ένωση δύο προσχεδιασμένων γραμμών.

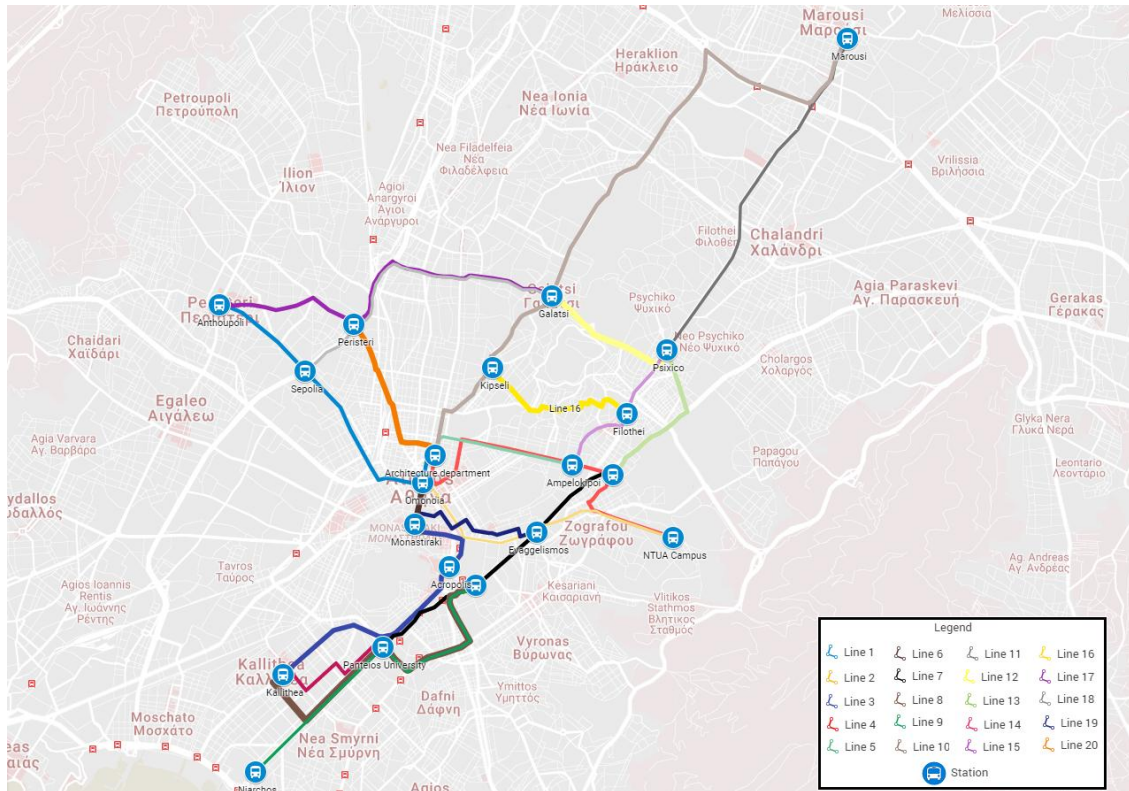
$$x_{ij} \cdot td_{ij} \leq l_{\max} \quad i, j \in A, i < j \quad (17)$$



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

### 4.1 Ανάλυση της περιοχής – Οδικό Δίκτυο

Για την παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε ως δίκτυο μελέτης το μητροπολιτικό δίκτυο της Αθήνας. Βάσει της κάλυψης της περιοχής από τα ήδη υπάρχοντα μέσα μαζικής μεταφοράς, έγινε η επιλογή των υποψήφιων στάσεων για το τελικό δίκτυο. Οι στάσεις επιλέχθηκαν δίνοντας προτεραιότητα στα πανεπιστήμια της πρωτεύουσας, τα νοσοκομεία, κεντρικά σημεία καθώς και σημεία έλξης τουριστών.



Σχ. 4.1: Χάρτης αποτύπωσης της περιοχής μελέτης και των προσχεδιασμένων γραμμών

### 4.2 Μετακινήσεις - Ζήτηση

Για τις μετακινήσεις απαιτούνται τα δεδομένα που προκύπτουν από τους πίνακες Προέλευσης – Προορισμού. Στα επόμενα δύο υπόκεφαλαια ακολουθούν πίνακες με τα δεδομένα επιβατικής ζήτησης καθώς και το κόστος της κάθε γραμμής που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο:

#### 4.2.1 Σύνολο μετακινούμενων

Για τη συνολική ζήτηση της περιοχής μελέτης, καταρτίστηκε με τυχαίο τρόπο ο πίνακας Προέλευσης – Προορισμού. Παρατίθενται ο πίνακας Προέλευσης – Προορισμού που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο μελέτης:

Πίνακας 4.2.1: Πίνακας προέλευσης – Προορισμού

Πίνακας Προέλευσης - Προορισμού (Επιβατική ζήτηση)																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	7349	7168	5528	7868	4558	5817	3295	5671	7405	2821	8062	2856	3163	7000	8958	8677	8587	10847	10711
2	7349	0	3354	6485	8553	7931	3819	5422	7663	7360	5199	8556	2973	6804	8000	8395	11209	10382	7762	10831
3	7168	3354	0	2555	8290	6502	6547	2924	7081	8307	7670	8747	4433	8132	9000	7632	12832	8749	12253	10488
4	5528	6485	2555	0	5841	8046	4830	6011	2964	8817	5844	3598	5973	6293	5000	11053	7710	7825	11753	12068
5	7868	8553	8290	5841	0	4793	6463	5415	3062	6134	5136	7936	6453	2445	6000	12341	10364	9061	7544	9361
6	4558	7931	6502	8046	4793	0	6117	5033	7647	5020	3652	5846	5011	8411	3000	8509	10877	9934	11562	11235
7	5817	3819	6547	4830	6463	6117	0	8093	6028	4296	2599	2108	3465	7321	7000	8219	11353	10806	12649	11720
8	3295	5422	2924	6011	5415	5033	8093	0	2201	6623	4612	3515	5716	5773	11000	10679	9381	12182	9980	9775
9	5671	7663	7081	2964	3062	7647	6028	2201	0	7755	3677	2598	3213	4229	12000	9764	10735	8642	9085	11428
10	7405	7360	8307	8817	6134	5020	4296	6623	7755	0	4988	2739	3482	7742	9000	9200	11415	12124	12569	11483
11	2821	5199	7670	5844	5136	3652	2599	4612	3677	4988	0	2724	8340	4041	7500	11396	9920	9492	8160	9935
12	8062	8556	8747	3598	7936	5846	2108	3515	2598	2739	2724	0	4833	4406	8000	11456	10475	10225	9924	8475
13	2856	2973	4433	5973	6453	5011	3465	5716	3213	3482	8340	4833	0	6166	3000	12276	12027	11830	12324	10542
14	3163	6804	8132	6293	2445	8411	7321	5773	4229	7742	4041	4406	6166	0	6500	10368	12845	9326	12455	12597
15	7000	8000	9000	5000	6000	3000	7000	11000	12000	9000	7500	8000	3000	6500	0	11661	12808	8276	7806	9537
16	8958	8395	7632	11053	12341	8509	8219	10679	9764	9200	11396	11456	12276	10368	11661	0	10805	9659	11152	7611
17	8677	11209	12832	7710	10364	10877	11353	9381	10735	11415	9920	10475	12027	12845	12808	10805	0	10388	10947	8651
18	8587	10382	8749	7825	9061	9934	10806	12182	8642	12124	9492	10225	11830	9326	8276	9659	10388	0	10536	9254
19	10847	7762	12253	11753	7544	11562	12649	9980	9085	12569	8160	9924	12324	12455	7806	11152	10947	10536	0	9508
20	10711	10831	10488	12068	9361	11235	11720	9775	11428	11483	9935	8475	10542	12597	9537	7611	8651	9254	9508	0

#### 4.2.2 Κατασκευαστικό κόστος

Το κόστος κατασκευής της κάθε υποψήφιας γραμμής που εισάγεται στο μοντέλο είναι το άθροισμα του κόστους κατασκευής της νησίδας που είναι κατασκευάζεται παράλληλα στην πορεία της γραμμής με το κόστος τοποθέτησης των πηνίων που απατούνται. Τα κόστη όπως και η επιβατική ζήτηση δεν αντιστοιχούν σε πραγματικές τιμές, είναι ανάλογες του μήκους της γραμμής και των χαρακτηριστικών της περιοχής που εξυπηρετεί. Παρατίθεται ο πίνακας του κόστους κατασκευής της κάθε υποψήφιας γραμμής:

Πίνακας 4.2.2: Επενδυτικό κόστος για την κάθε προσχεδιασμένη γραμμή

Γραμμές	Κόστος κατασκευής νησίδας [1000 €]	Κόστος τοποθέτησης πηνίων [1000 €]	Συνολικό κόστος [1000 €]
1	54	36	90000
2	51	40	91000
3	51	34,6	85600
4	53	46	99000
5	37	34	71000
6	9	34	43000
7	55	36	91000
8	58	38	96000
9	56	40	96000
10	124	44	168000
11	60	34	94000
12	26	36	62000
13	35	32	67000
14	23	42	65000
15	28	34	62000
16	27	46	73000
17	73	46	119000
18	52	44	96000
19	20	38	58000
20	31	34	65000

### **4.3 Παραδοχές**

Σε αυτό το υποκεφάλαιο κρίνεται απαραίτητο να αναφερθούν όλες οι παράμετροι οι οποίες δεν λαμβάνονται υπόψη στο μοντέλο σχεδιασμού. Παράμετροι που επηρεάζονται από την ανθρώπινη συμπεριφορά είναι δύσκολα προσεγγίσιμες και δεν παρουσιάζουν κάποιο πρότυπο μοντελοποίησης, ως αποτέλεσμα να μην συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία κάνει τις ακόλουθες παραδοχές:

- I. Οι μετακινήσεις του πίνακα Π – Π είναι ωριαίες και παραμένουν σταθερές όλο το 24ωρο. Η δημιουργία των τιμών προέκυψε με τη λογική της ώρας αιχμής, όπως είναι λογικό να σχεδιάζεται ένα δίκτυο.
- II. Στη μελέτη δεν συμπεριλήφθηκαν χρόνοι διαδρομής, ταχύτητες κίνησης και χρόνοι μετεπιβίβασης των επιβατών.

Στις παραδοχές που παρατέθηκαν θα μπορούσαν να προστεθούν και άλλες, όμως στην παρούσα διπλωματική παρουσιάζουν μικρή σημασία. Παράγοντες που θα μπορούσαν να ληφθούν υπόψη είναι οι καιρικές συνθήκες, η χωρητικότητα των οχημάτων εξυπηρέτησης, οι χρόνοι καθυστέρησης, οι χρόνοι μετεπιβίβασης, η ανθρώπινη συμπεριφορά. Σε περίπτωση που επιθυμείται περαιτέρω έρευνα του αντικειμένου μελέτης, παραδοχές δευτερευούσης σημασίας όπως αυτές που αναφέρθηκαν μπορούν να συμπεριληφθούν στο μαθηματικό μοντέλο ύστερα από μαθηματική τους μοντελοποίηση.



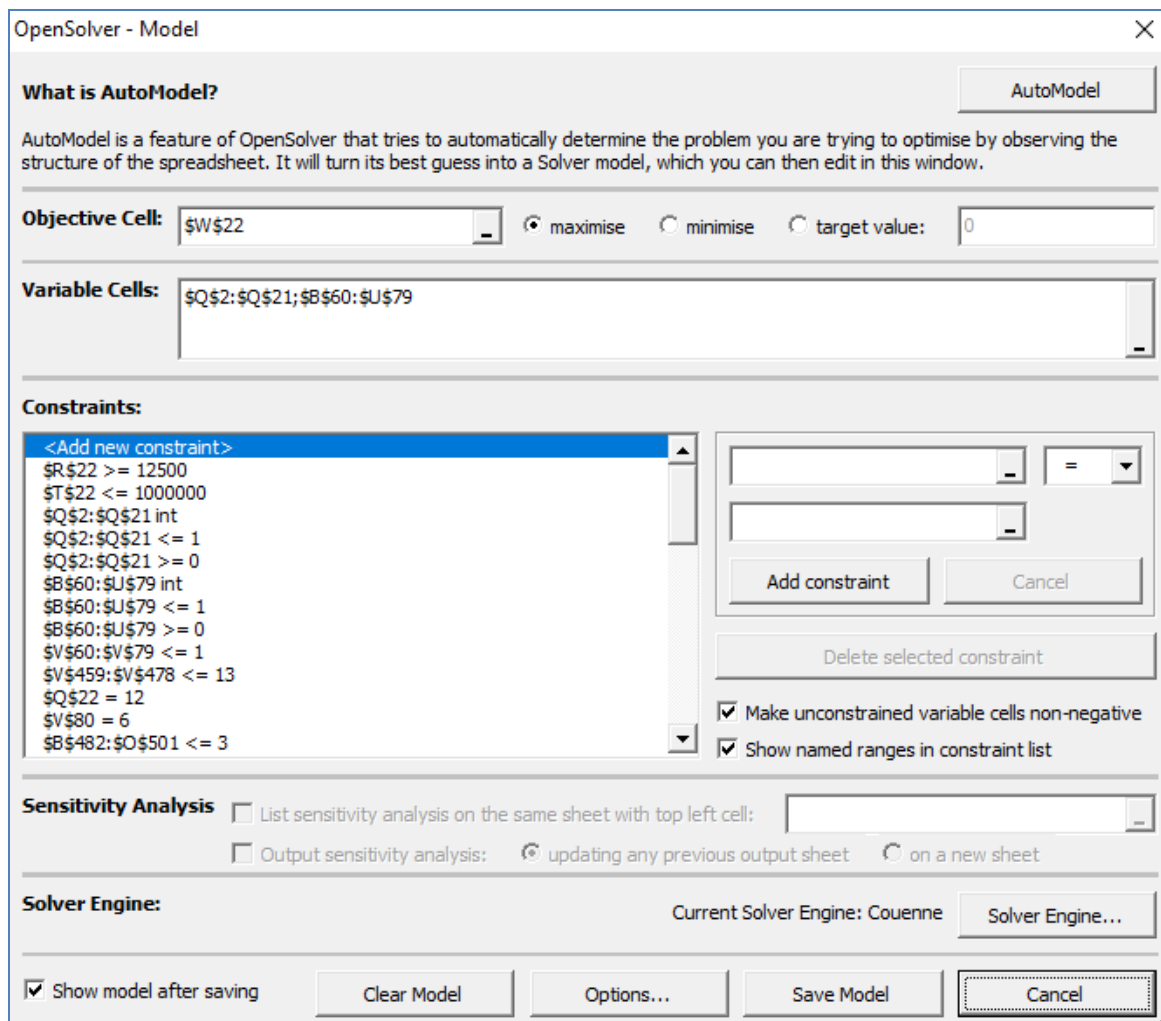
## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΗ**

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται λεπτομερώς οι μέθοδοι και διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για τη δημιουργία του μοντέλου επίλυσης για το πρόβλημα σχεδιασμού δικτύων. Επισυνάπτονται εικόνες από το περιβάλλον στο οποίο δημιουργήθηκε το μοντέλο και αναλύεται το περιβάλλον του, οι διαδικασίες και τα βήματα σχεδιασμού και τέλος οι τρόποι βελτιώσεις των αποτελεσμάτων που αποδίδει η επίλυση του αλγορίθμου.

### **5.1 Περιβάλλον επίλυσης**

Το μοντέλο επίλυσης που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη δημιουργήθηκε εξ' αρχής από τον μελετητή της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Περιβάλλον εργασίας αποτέλεσε το περιβάλλον του excel και πιο συγκεκριμένα το λογισμικό βελτιστοποίησης του Open solver 2.8.6 advanced.

Ως μηχανή επίλυσης του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε ο μη γραμμικός solver COIN-OR Couenne. Η εφαρμογή και δημιουργία του μοντέλου ολοκληρώθηκε σε ένα 2 GHz προσωπικό laptop με 4 GB RAM. Ο αριθμός των μεταβλητών απόφασης έφτασε το μέγεθος των 420 και ο χρόνος που απαιτείται για την επίλυση του προβλήματος είναι μικρότερος του 1 λεπτού. Στην εικόνα που επισυνάπτεται ακριβώς από κάτω παρατίθεται η μορφή ενός τυπικού περιβάλλοντος του συγκεκριμένου λογισμικού.



Εικόνα 5.1: Τυπικό παράθυρο από το περιβάλλον του λογισμικού Open Solver

Αυτά που καθορίζονται από το δημιουργό του έкаστου μοντέλου στο συγκεκριμένο λογισμικό είναι η αντικειμενική συνάρτηση, οι μεταβλητές απόφασης και οι περιορισμοί που διέπουν το πρόβλημα.

## 5.2 Αναλυτική παρουσίαση των βημάτων επίλυσης

Το μοντέλο που επιλύει το πρόβλημα σχεδιασμού δικτύου στην παρούσα διπλωματική εργασία ακολουθεί τη λογική που παρουσιάζεται ακριβώς από κάτω :

### **α) Εισαγωγή των δεδομένων**

Απαραίτητα δεδομένα για την επίλυση του προβλήματος αποτελούν ο πίνακας  $\Pi - \Pi$ , το κόστος κατασκευής της νησίδας που θα είναι παράλληλη στην πορεία της λεωφορειογραμμής για να εξασφαλίζει την αποκλειστική κίνηση του λεωφορείου, το κόστος τοποθέτησης των πηνίων (το άθροισμα των δύο αυτών κοστών αποδίδει το συνολικό κόστος για την κατασκευή της έкаστης γραμμής). Επίσης σα δεδομένα εισήχθησαν τα χαρακτηριστικά του δικτύου μελέτης. Η τοποθέτηση των πηνίων απαιτεί



τη γνώση των κρίσιμων σημείων της πορείας του λεωφορείου όπως τα σημεία με μεγάλη κλίση, τα σημεία της πορείας στα οποία υπάρχει φωτεινή σηματοδότηση καθώς και τα σημεία αυτά που μπορούν να αποτελέσουν αφετηρίες και τερματικούς σταθμούς.

Ο πίνακας Προέλευσης - Προορισμού είναι ένας τετραγωνικός πίνακας  $N \times N$ , όπου  $N$  ο αριθμός των κόμβων του δικτύου. Ο πίνακας που παρουσιάζει την κλίση των συνδέσμων του δικτύου, είναι των ίδιων διαστάσεων,  $N \times N$ . Σε αυτόν παρουσιάζονται οι κλίσεις των διαδοχικών στάσεων. ο πίνακας αυτός για να είναι χρήσιμος στο μοντέλο μετατρέπεται σε δυαδικό, έναν πίνακα δηλαδή που παίρνει τιμές 0 και 1. Μηδέν παίρνει για κλίσεις διαδοχικών στάσεων μικρότερες του 2%, ενώ σε αντίθετη περίπτωση όπου υπάρχει η ανάγκη τοποθέτησης ηλεκτρικού πηνίου το κελί παίρνει την τιμή 1. Αντίστοιχη μορφή παρουσιάζει ο πίνακας που αποδίδει τα σημεία τα οποία μπορούν να αποτελέσουν την αφετηρία και τον τερματικό σταθμό μιας γραμμής, είναι δυαδικός ακέραιος πίνακας ο οποίος παρουσιάζει τιμές ίση με τη μονάδα μόνο στη διαγώνιο, όλες οι υπόλοιπες τιμές του πίνακα είναι ίσες με το μηδέν. Όταν η τιμή ενός κελιού είναι ίση με τη μονάδα σημαίνει ότι το σημείο αυτό μπορεί να αποτελέσει αφετηρία και τερματικό σταθμό, σε αντίθετη περίπτωση ισχύει η αντίθετη υπόθεση. Επίσης, ο πίνακας των φωτεινών σηματοδοτών είναι ακέραιος και δυαδικός. Στα κελία που η τιμή είναι ίση με το 1 σημαίνει ότι ανάμεσα σε δύο διαδοχικές στάσεις υπάρχει φωτεινός σηματοδότης ενώ σε αντίθετη περίπτωση δεν παρεμβάλλεται φωτεινή ένδειξη μεταξύ των δύο στάσεων. Προτείνεται η τοποθέτηση πηνίων στους φωτεινούς σηματοδότες λόγω του χρόνου φόρτισης. Όσο περισσότερη η διάρκεια φόρτισης, τόσο περισσότερη ενέργεια λαμβάνει η μπαταρία. Συνεπώς, στην περίπτωση που η ένδειξη είναι κόκκινη, το λεωφορείο λαμβάνει ενέργεια καθ' όλη τη διάρκεια αναμονής.

Οι πίνακες του κόστους είναι ίσοι με  $M \times 1$ . Όπου  $M$  ο αριθμός των γραμμών που εισάγονται στο μοντέλο και πρόκειται να αναφερθεί στην υποενότητα που ακολουθεί.

## **β) Επιλογή και εισαγωγή των προεπιλεγμένων γραμμών**

Στο μοντέλο επίλυσης εισάγονται  $M$  μικρές προκατασκευασμένες γραμμές. Οι γραμμές αυτές αποτελούνται από το πολύ 3 – 4 στάσεις και η επιλογή τους γίνεται από το μελετητή. Για λόγους απλότητας και για την ενσωμάτωση της κρίσης του μηχανικού σχετικά με το δίκτυο εισάγονται οι γραμμές, και δεν τις κατασκευάζονται από το ίδιο το μοντέλο. Επίσης αυτό συμβαίνει και λόγους απόδοσης ενός ρεαλιστικού μοντέλου, καθώς είναι γνωστή η ζήτηση και οι άξονες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Πρόκειται για ένα υφιστάμενο δίκτυο μελέτης, το οποίο παρουσιάζει 2 γραμμές μετρό, 1 ηλεκτρικού σιδηρόδρομου και πολλαπλές γραμμές αστικών λεωφορείων. Επομένως η πολυπλοκότητα του δικτύου σε συνδυασμό με τα ιδιαίτερα του χαρακτηριστικά επιβάλλει την επιλογή των γραμμών.

Αρχικά επιλέγονται τα σημεία ενδιαφέροντος βάσει των οποίων θα υλοποιηθούν οι συνδυασμοί και θα προκύψουν οι γραμμές. Τα σημεία που θεωρήθηκε ότι υπάρχει ανάγκη για επιπλέον παροχή υπηρεσιών και καλύτερη πρόσβαση στα κεντρικά σημεία της πρωτεύουσας είναι τα ακόλουθα:

Πίνακας 5.1: Σημεία ενδιαφέροντος

Στάσεις	α/α
Φιλοθέη	1
Σεπόλια	2
Ομόνοια	3
Ευαγγελισμός	4
Ακρόπολη	5
Μοναστηράκι	6
Νιάρχος	7
Καλλιμάρμαρο	8
Φάρος Ψυχικού	9
ΕΜΠ	10
Οδοντιατρική	11
Πάντειος	12
Ίλιον	13
Γαλάτσι	14
Καλλιθέα	15
Μαρούσι	16
Κυψέλη	17
Αρχιτεκτονική	18
Ανθούπολη	19
Αμπελόκηποι	20

Βάσει αυτών των σημείων πραγματοποιήθηκαν συνδυασμοί οι οποίοι αποδίδουν μικρές γραμμές. Οι γραμμές αυτές εισάγονται στο μοντέλο επίλυσης. Οι γραμμές αυτές ικανοποιούν ανάγκες που δημιουργούν οι ελλείψεις των υφιστάμενων λεωφορειακών γραμμών καθώς και μέσων σταθερής τροχιάς. Έχουν σχεδιαστεί λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που τίθενται από το μοντέλο. Οι συνδυασμοί που πραγματοποιήθηκαν είναι οι ακόλουθοι:

Πίνακας 5.2: Αλληλουχία στάσεων

Γραμμές	Αλληλουχία στάσεων			
<b>1</b>	13	2	3	
<b>2</b>	10	4	3	
<b>3</b>	15	5	6	
<b>4</b>	10	11	20	18
<b>5</b>	20	17		
<b>6</b>	6	3		
<b>7</b>	12	8	4	11
<b>8</b>	15	12	4	

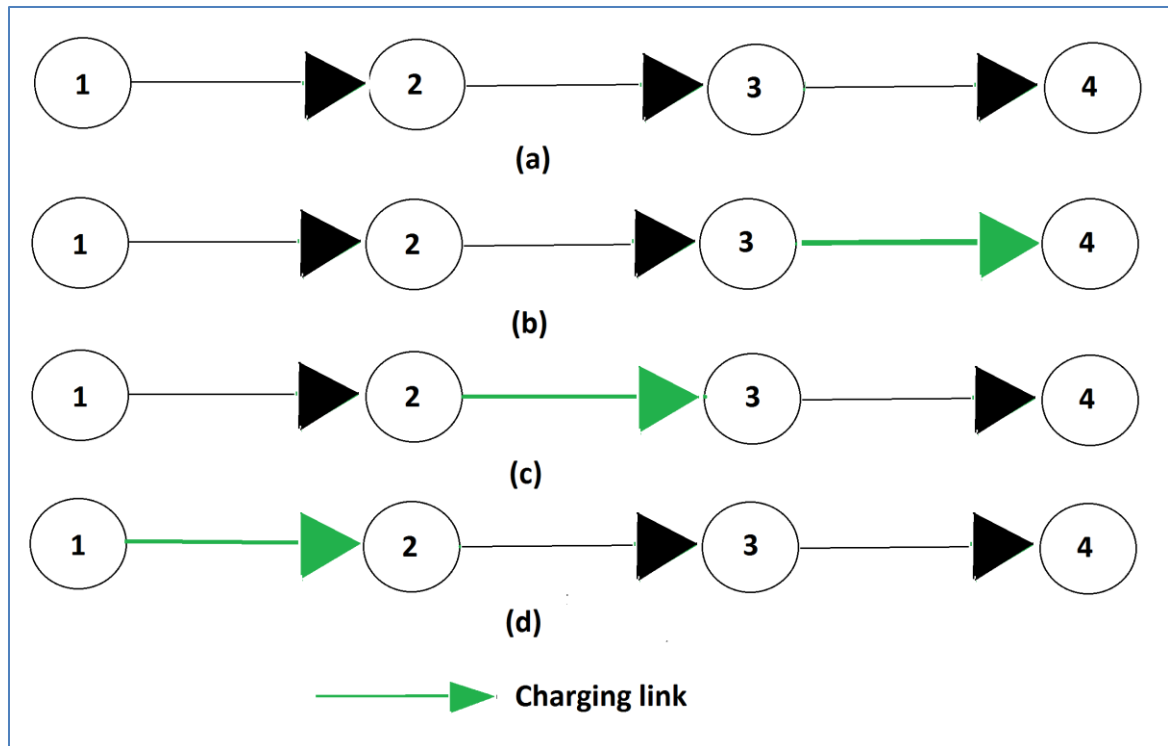
Γραμμές	Αλληλουχία στάσεων			
9	7	12	8	
10	16	14	17	18
11	16	9		
12	9	14		
13	9	11		
14	15	12		
15	9	1	20	
16	7	15		
17	13	19	14	
18	2	19	14	
19	4	6		
20	19	18		

### γ) Βελτιστοποίηση

Βασικές παράμετροι του μοντέλου αποτελούν το τελικό κόστος κατασκευής του δικτύου καθώς και ο βαθμός εξυπηρέτησης της ζήτησης. Βάσει αυτών των δύο εντοπίζονται οι συνδυασμοί των τμηματικών γραμμών προκειμένου να παραχθεί ένα δίκτυο με το χαμηλότερο δυνατό κόστος σε συνδυασμό με το μεγαλύτερο αριθμό εξυπηρέτησης της επιβατικής ζήτησης.

Το δίκτυο που αποδίδει το μοντέλο είναι πιθανό να παρουσιάζει επανάληψη κάποιας στάσης ύστερα από τη σύνδεση δύο μικρών γραμμών, καθώς δεν είναι απαγορευτικό από τους περιορισμούς που έχουν τεθεί. Κρίνεται όμως απαραίτητη η κατάργηση μίας εκ των δύο στάσεων.

Η κατάργηση βέβαια της μίας στάσης μπορεί να επιφέρει την ανάγκη τοποθέτησης επιπλέον πηνίων τροφοδοσίας. Αυτό συμβαίνει καθώς η κατάργηση μιας στάσης από την αλληλουχία των στάσεων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μήκους διαδρομής μεταξύ της στάσης που προηγείται και αυτής που έπεται της καταργηθείσας στάσης. Οι δύο αυτές στάσεις πλέον είναι διαδοχικές, γεγονός που δεν ίσχυε πριν την κατάργηση καθώς παρεμβαλλόταν ανάμεσα τους η καταργηθείσα. Η λογική του ελέγχου μπορεί να γίνει αντιληπτή από το σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 5.3: Έλεγχος ανάγκης επιπλέον πηγών τροφοδοσίας

Στο παραπάνω σχήμα, γίνεται αντιληπτό ότι ο έλεγχος πραγματοποιείται για κάθε διαδοχικό σύνδεσμο των γραμμών του δικτύου σχεδιασμού. Το πράσινο βέλος αντιπροσωπεύει την επαλήθευση του ελέγχου, όπου ο έλεγχος δεν εγκριθεί εγκαθίσταται επιπλέον τοποθέτηση πηγών τροφοδοσίας στον αντίστοιχο σύνδεσμο. Ο έλεγχος πραγματοποιείται για τις κλίσεις ( $\leq 2\%$ ) και τις αποστάσεις ( $\leq 10$  km) των συνδέσμων που δημιουργούνται ύστερα από την κατάργηση των επαναλαμβανόμενων στάσεων.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι παράμετροι που ορίστηκαν από τον χρήστη, οι τιμές που δόθηκαν και τα αποτελέσματα από την επίλυση του προγράμματος.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το πρόβλημα σχεδιασμού δικτύων της παρούσας διπλωματικής έκανε χρήση του μοντέλου που παρουσιάστηκε λεπτομερώς στο κεφάλαιο 6. Το πρόβλημα λύθηκε για απόδοση δικτύου με 6 τελικές γραμμές χρησιμοποιώντας κάποια σενάρια τα οποία στηρίχτηκαν στα βάρη των μεταβλητών απόφασης.

Τα αποτελέσματα που αποδίδει το κάθε σενάριο παρουσιάζονται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο και η παρουσίασή τους ακολουθεί την εξής μορφή:

- I. Επιλογή βαρών
- II. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης
- III. Ανάλυσης ευαισθησίας

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά από κάθε υποψήφια προσχεδιασμένη γραμμή που έχει εισαχθεί στο μοντέλο.

Πίνακας 6.1 Κύρια χαρακτηριστικά των υποψήφιων γραμμών

Γραμμές	Κόμβοι	Επιβατική ζήτηση [επιβ/ώρα]	Μήκος [χλμ]	Κόστος κατασκευής [1000 € ]	Κόστος τοποθέτησης πηνίων [1000 € ]	Συνολικό κόστος [1000 € ]
1	13-2-3	13000	5,4	54	36	90000
2	10-4-3	17000	5,1	51	40	91000
3	15-5-6	11000	5,1	51	34,6	85600
4	10-11-20-18	13000	5,3	53	46	99000
5	20-17	5000	3,7	37	34	71000
6	6-3	13000	0,9	9	34	43000
7	12-8-4-11	11000	5,5	55	36	91000
8	15-12-4	12500	5,8	58	38	96000
9	7-12-8	7000	5,6	56	40	96000
10	16-14-17-18	11300	12,4	124	44	168000
11	16-9	4500	6	60	34	94000
12	9-14	5000	2,6	26	36	62000
13	9-11	3000	3,5	35	32	67000
14	15-12	10000	2,3	23	42	65000

Γραμμές	Κόμβοι	Επιβατική ζήτηση [επιβ/ώρα]	Μήκος [χλμ]	Κόστος κατασκευής [1000 € ]	Κόστος τοποθέτησης πηνίων [1000 € ]	Συνολικό κόστος [1000 € ]
15	9-1-20	12000	2,8	28	34	62000
16	7-15	8000	2,7	27	46	73000
17	13-19-14	7000	7,3	73	46	119000
18	2-19-14	5500	5,2	52	44	96000
19	4-6	20000	2	20	38	58000
20	19-18	12000	3,1	31	34	65000

### **6.1 Επιλογή παραμέτρων**

Προκειμένου να δοθεί λύση στο πρόβλημα σχεδιασμού 6 γραμμών στο δίκτυο, απαιτείται ο ορισμός των τιμών των βασικών παραμέτρων του. Ο ορισμός αυτών των παραμέτρων θα καθορίσουν τη μορφή του τελικού δικτύου για το οποίο σχεδιάζουμε και το μοντέλο.

Οι αρχικές παράμετροι του προβλήματος είναι οι ακόλουθες:

- Μέγιστο μήκος διαδρομής: 10km
- Αριθμός γραμμών δικτύου: 6
- Μέγεθος επενδυτικού κεφαλαίου: 1,500,000 €
- Μέγιστος αριθμός στάσεων ανά γραμμή: 10
- Αριθμός προσχεδιασμένων γραμμών: 20

Το μοντέλο καταλήγει σε αποτελέσματα λαμβάνοντας υπόψη τους παραμέτρους που έχουν προκαθοριστεί. Ωστόσο για να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα για την αξιολόγηση του μοντέλου καθώς και για τον καλύτερο σχεδιασμό αποφασίζεται να διεξαχθούν ορισμένα σενάρια τα οποία στηρίζονται στα βάρη των παραμέτρων. Τα βάρη αυτά σχετίζονται με την προτεραιότητα που δίνεται στους δύο καθοριστικούς σχεδιαστικούς στόχους του μοντέλου, την επιβατική ζήτηση και το επενδυτικό κόστος.

#### **6.1.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων σεναρίου 1**

Στο σενάριο 1 δίνεται σημαντική προτεραιότητα στην εξυπηρέτηση της επιβατικής ζήτησης, παραμερίζοντας το συνολικό κόστος κατασκευής του δικτύου. Τα βάρη του σεναρίου 1 παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας 7.1.1):

Πίνακας 6.1.1 Βάρη αντικειμενικών παραμέτρων σεναρίου 1

Αντικειμενικοί παράμετροι	Σενάριο 1
Επενδυτικό κόστος	0.1
Επιβατική ζήτηση	0.9

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το σενάριο 1 παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας 6.1.2):

Πίνακας 6.1.2 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης δικτύου για το σενάριο 1

Σενάριο 1			
Τελικές διαδρομές	Προσχεδιασμένες γραμμές	Εξυπηρέτηση επιβατικής ζήτησης	Συνολικό κόστος
Διαδρομή 1	1-6	26000	133000
Διαδρομή 2	4-7	24000	19000
Διαδρομή 3	3-8	23500	181600
Διαδρομή 4	14-16	18000	138000
Διαδρομή 5	15-19	12000	120000
Διαδρομή 6	2-20	15600	29000
Σύνολο		152500	918600

#### 6.1.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων σεναρίου 2:

Στο σενάριο 2 δίνεται σημαντική προτεραιότητα στο συνολικό κόστος κατασκευής του δικτύου παραμερίζοντας την εξυπηρέτηση της επιβατικής ζήτησης. Τα βάρη του σεναρίου 2 παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας 6.1.3):

Πίνακας 6.1.3 Βάρη αντικειμενικών παραμέτρων σεναρίου 2

Αντικειμενικοί παράμετροι	Σενάριο 2
Επενδυτικό κόστος	0.9
Επιβατική ζήτηση	0.1

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το σενάριο 2 παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας 6.1.4):

Πίνακας 6.1.4 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης δικτύου για το σενάριο 2

Σενάριο 2			
Τελικές διαδρομές	Προσχεδιασμένες γραμμές	Εξυπηρέτηση επιβατικής ζήτησης	Συνολικό κόστος
Διαδρομή 1	1-6	26000	130000
Διαδρομή 2	2-5	22000	162000
Διαδρομή 3	12-13	21000	129000
Διαδρομή 4	3-14	21000	150600
Διαδρομή 5	15-19	32000	120000
Διαδρομή 6	16-20	20000	138000
Σύνολο		142000	829600



## **6.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο σεναρίων**

Σύμφωνα με τους πίνακες των δύο σεναρίων, πίνακες επιλογής βαρών καθώς και πίνακες αποτελεσμάτων, παρατηρείται ότι η επιλογή των προσχεδιασμένων γραμμών για το τελικό δίκτυο καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά της κάθε μικρής γραμμής. Από την άλλη μεριά, η συγχώνευση δύο μικρών γραμμών για το σχεδιασμό του τελικού δικτύου των 6 διαδρομών, φαίνεται να εξαρτάται σημαντικά από το βάρος των αντικειμενικών παραμέτρων. Πράγματι, οι γραμμές 1, 2, 3, 6, 14, 15, 16, 19, 20 οι οποίες παρουσιάζουν μεγάλη ζήτηση από το επιβατικό κοινό έχουν επιλεγεί και από τα δύο σεσάρια, αλλά σε διαφορετικές λεωφορειακές γραμμές. Η ομοιότητα που παρουσιάζουν τα δύο σεσάρια διακρίνεται στις τελικές γραμμές 1 και 5 οι οποίες παρουσιάζουν ακριβώς την ίδια μορφή και στα δύο σεσάρια. Αυτό το γεγονός υποδηλώνει την υποχρεωτική δημιουργία αυτών των δύο γραμμών από την οπτική και κοινωνικών αλλά και οικονομικών παραγόντων. Η σύνδεση των υπολειπόμενων επιλεγέντων γραμμών διαφέρει βάσει της ιεράρχησης των παραμέτρων, υποδηλώνοντας ότι οι περιορισμοί στο επενδυτικό κόστος είναι πολύ πιθανό να παρεμποδίζουν την άμεση σύνδεση από μία αστική περιοχή σε μια άλλη.

Τα πορίσματα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η επιλογή σταθερών διαδρομών καθορίζεται από το μοντέλο ανεξαρτήτως της ιεράρχησης των παραμέτρων, καθώς οι αποφάσεις λαμβάνονται βάσει των προτεραιοτήτων των decision – makers. Επιπλέον, η μη επιλογή των προσχεδιασμένων γραμμών 9, 10, 11, 17 και 18 σε κανένα από τα δύο σεσάρια υποδηλώνει ότι ορισμένοι επιβάτες (associated passengers) δεν μπορούν να φτάσουν στον προορισμό της επιθυμίας τους άμεσα.

Κρίνοντας τα δύο σεσάρια συνολικά, διακρίνεται ότι η ιεράρχηση του μοντέλου βάσει της επιβατικής εξυπηρέτησης αποδίδει μια βελτιωμένη εκδοχή των τελικών αποτελεσμάτων που φτάνει την τάξη του 7% όσον αφορά τη συγκεκριμένη παράμετρο ενώ ταυτόχρονα το κόστος αυξάνεται κατά 11%. Στην αντίθετη περίπτωση που το σεσάρια δίνει προτεραιότητα στη μείωση του επενδυτικού κόστους διακρίνεται μείωση του κόστους επένδυσης κατά 10% αλλά ταυτόχρονα και μείωση στην εξυπηρέτηση του επιβατικού κοινού κατά 6.5%.

## **6.3 Έλεγχος ανάγκης επιπλέον εγκατάστασης πηνίων τροφοδοσίας**

Όπως παρατηρείται στους πίνακες του κεφαλαίου 7.1, οι γραμμές που δημιουργούνται εμπεριέχουν αποστάσεις μεταξύ διαδοχικών στάσεων οι οποίες είναι μικρότερες των 10km και κλίσεις μικρότερες του 2%. Παρ' όλα αυτά το μοντέλο συνδέει γραμμές οι οποίες είναι πιθανό να περιλαμβάνουν την ίδια στάση σε μία γραμμή. Ο περιορισμός της αλληλουχίας των στάσεων του το επιτρέπει. Το μοντέλο ουσιαστικά παράγει γραμμές και στην περίπτωση που μια στάση επαναλαμβάνεται σε μια γραμμή διαγράφεται η μία εκ των δύο επαναλαμβανόμενων στάσεων.

Όπως έχει αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο η κατάργηση αυτή είναι πιθανό να επιφέρει την ανάγκη τοποθέτησης επιπλέον πηνίων τροφοδοσίας. Η δημιουργία νέων

συνδέσμων μεταξύ των στάσεων που προηγούνται και έπονται της καταργηθείσας, δημιουργεί την ανάγκη ενός νέου ελέγχου εκ των υστέρων.

Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 6 η αυτονομία των OLEV φτάνει το εύρος των 10km. Επίσης σε κλίσεις μεγαλύτερες του 2% έχει την ανάγκη επιπλέον πηνίων τροφοδοσίας. Επομένως, είναι απαραίτητος ο έλεγχος για την ανάγκη επιπλέον πηνίων τροφοδοσίας. Στη συνέχεια, επισυνάπτεται ο πίνακας των γραμμών που συμπεριλαμβάνονται στο δίκτυο, και ελέγχεται η επανεμφάνιση των στάσεων στην ίδια γραμμή. Αφού βρεθούν οι στάσεις που επαναλαμβάνονται, και καταργηθεί η μία εκ των δύο, ελέγχονται οι διαδοχικές αποστάσεις και κλίσεις των συνδέσμων που δημιουργούνται.

Πίνακας 6.2: Ανίχνευση στάσεων που επαναλαμβάνονται ανά γραμμή

<b>Έλεγχος επαναλαμβανόμενων στάσεων</b>		
<b>Σενάριο 1</b>		
Διαδρομή	Αλληλουχία στάσεων 1 <sup>ης</sup> γραμμής σύνδεσης	Αλληλουχία στάσεων 2 <sup>ης</sup> γραμμής σύνδεσης
1-6	13-2- <b>3</b>	6- <b>3</b>
4-7	10- <b>11</b> -20-18	12-8-4- <b>11</b>
3-8	10- <b>4</b> -3	15-12- <b>4</b>
14-16	15-12	7-15
15-19	9-1-20	4-6
2-20	10-4-3	19-18
<b>Σενάριο 2</b>		
1-6	13-2- <b>3</b>	6- <b>3</b>
2-5	<b>10</b> -4-3	<b>10</b> -11-20-18
12-13	<b>9</b> -14	<b>9</b> -11
3-14	<b>15</b> -5-6	<b>15</b> -12
15-19	9-1-20	4-6
16-20	7-15	19-18

Πίνακας 6.3: Αποστάσεις διαδοχικών στάσεων ύστερα από την κατάργηση μίας εκ των δύο επαναλαμβανόμενων στάσεων

<b>Έλεγχος διαδοχικών στάσεων</b>		
Διαδοχικές στάσεις	Απόσταση	Κλίση
2-6	4	0%
10-20	2,8	1%
10-3	<b>10,5</b>	0%
2-6	4	0%
3-11	7	1%
14-11	4,5	0%
6-12	4	<b>3%</b>

Εγκαθίστανται τα πηνία των δύσκολων περιοχών και σε αυτά προστίθενται τα επιπλέον πηνία τροφοδοσίας, όπου αυτό καθίσταται αναγκαίο για την εξασφάλιση της κίνησης των λεωφορείων. Οι αριθμοί που εμφανίζονται στους επισυναπτόμενους πίνακες

με κόκκινο χρώμα, ξεπερνούν το μέγιστο όριο που τίθεται από τον έλεγχο. Σύμφωνα με τους πίνακες, οι σύνδεσμοι 10-3 και 6-12, που αντιστοιχούν στις γραμμές 3-8, 3-14 εμφανίζουν ανάγκη επιπλέον πηγών τροφοδοσίας.

#### **6.4 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων**

Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιείται με απώτερο σκοπό την ποιοτική περιγραφή του βαθμού επιρροής κάθε παραμέτρου στα αποτελέσματα του μοντέλου. Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε για τις δύο ακόλουθες παραμέτρους: το επενδυτικό κόστος και την επιβατική ζήτηση. Λήφθηκαν τιμές των παραμέτρων με απόκλιση που φτάνει βαθμιαία και το 20% των αρχικών τιμών που προέκυψαν από το σενάριο 1.

Οι μεταβλητές μαζί με τις μεταβολές που εφαρμόστηκαν σε αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων σχεδιασμού

Δεδομένα	Αποτελέσματα		
	Εξυπηρέτηση επιβατικής ζήτησης	Επενδυτικό κόστος	Αντικειμενική συνάρτηση
<b>Επιβατική ζήτηση</b>			
Αρχική τιμή	152,500	918,600	45,390
-10%	137,250	918,600	31,665
-20%	122,000	918,600	17,940
+10%	167,750	918,600	59,115
+20%	183,000	918,600	72,840
<b>Επενδυτικό κόστος</b>			
Αρχική τιμή	152,500	918,600	45,390
-10%	152,500	826,740	54,576
-20%	152,500	734,880	63,762
+10%	152,500	1,010,460	36,204
+20%	152,500	1,102,320	27,018

Όσον αφορά την εξυπηρέτηση της επιβατικής ζήτησης, παρατηρείται ότι οι τιμές που προκύπτουν για το κόστος είναι ανεξάρτητες των δεδομένων εισόδου. Το ίδιο παρατηρείται και για τις τιμές κόστους. Τα αποτελέσματα που διεξήχθησαν δηλώνουν ότι μικρές αποκλίσεις στα δεδομένα εισόδου δεν επηρεάζουν τις γραμμές που δημιουργεί το μοντέλο.

#### **6.5 Συμπεράσματα**

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εστιάζει στον αποδοτικό σχεδιασμό ενός δικτύου οχημάτων σταθερής τροχιάς OLEV. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο προγραμματισμού. Το μοντέλο εφαρμόστηκε σε πραγματικό δίκτυο με δεδομένα από την πόλη της Αθήνας. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι το μοντέλο δημιουργεί

λογικές διαδρομές, ενώ η ανάλυση ευαισθησίας έδειξε ότι οι μεταβολές σε διάφορους παραμέτρους επιφέρουν αποτελέσματα με έναν λογικό και συστηματικό τρόπο. Η ευελιξία και αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου μοντέλου το καθιστά εφικτή την επιλογή του για μελλοντικές έρευνες και βελτιώσεις. Αυτή η εργασία θα μπορούσε να αποτελέσει την εισαγωγή πρόσθετων σχεδιαστικών στόχων και μελετών άλλων αλγορίθμων για την επίλυση σχεδιαστικών προβλημάτων.

Το μοντέλο στη συγκεκριμένη εργασία επιλύθηκε για δύο σενάρια. Το ένα έδινε μεγάλη βαρύτητα στο επενδυτικό κόστος κατασκευής του δικτύου, ενώ το άλλο στην εξυπηρέτηση της επιβατικής ζήτησης. Τα δύο σενάρια παρουσίασαν μια επανάληψη κάποιων γραμμών, αλλά με τη σύνδεση των μικρών γραμμών να είναι διαφορετική μεταξύ τους σε κάθε περίπτωση. Περιορισμοί όπως οι οικονομικοί φαίνεται να παρεμπόδισαν την άμεση σύνδεση δύο γραμμών, παρ' όλα δεν θα ήταν αδύνατον να δημιουργηθεί ένα μοντέλο σχεδιασμού δικτύου χωρίς να ληφθούν υπόψη οικονομικοί περιορισμοί, καθώς θα προέκυπτε μια μη ρεαλιστική από οικονομικής άποψης λύση.

Ο σύντομος χρόνος επίλυσης του μοντέλου σε συνδυασμό με την προσαρμοστικότητά στις ανάγκες του δικτύου, επιτρέπει τη δοκιμή αρκετών σεναρίων για τον πειραματισμό και την εύρεση βέλτιστων λύσεων. Αυτά τα χαρακτηριστικά το καθιστούν αρκετά ελκυστικό στον κλάδο των μεταφορών καθώς συνδυάζει το χαρακτηριστικό της γρήγορης απόδοσης λύσεων και ταυτόχρονα αξιοπιστία των αποτελεσμάτων προσεγγίζοντας όσο το δυνατόν πιο καλά τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου δικτύου.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΕΠΙΛΟΓΟΣ

### 7.1 Ανασκόπηση του προβλήματος

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσίασε μια επίλυση του προβλήματος σχεδιασμού δικτύων σε αστικές περιοχές. Το αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας αφορά το σχεδιασμό ενός δικτύου με την οπτική μιας φιλικής προς το περιβάλλον λύσης. Είναι σημαντικό να γίνει αντιληπτό από τον αναγνώστη ότι το πρόγραμμα επίλυσης προωθεί τη βιώσιμη κινητικότητα και την άμεση εξυπηρέτηση των μετακινουμένων στους προορισμούς της επιθυμίας τους. Θέτοντας το πρώτο χαρακτηριστικό σε προτεραιότητα, συντάσσεται το πρόβλημα σχεδιασμού. Όπως έχει αναφερθεί και στα πρώτα κεφάλαια, έρευνα και σχεδιασμός που παραγκωνίζουν τις ανάγκες του περιβάλλοντος δεν είναι αποδεκτές πλέον. Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον όλης της επιστημονικής κοινότητας μεταφορών έχει στραφεί στην προσαρμοστικότητα του σχεδιασμού στις ανάγκες του περιβάλλοντος. Συνδυάζοντας λοιπόν τη λογική του σχεδιασμού με τους περιορισμούς που τη συνοδεύουν, μαζί με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας η εργασία αυτή αναζητά την καινοτομία που θα αποτελέσει σοβαρή πρόταση για το μέλλον. Πιο συγκεκριμένα πρόκειται για μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην πόλη της Αθήνας προκειμένου να προστεθεί ένα νέο μέσο μαζικής μεταφοράς στο ήδη υφιστάμενο δίκτυό της.

Αρχικά έγινε εκτενής περιγραφή των ήδη υπαρχόντων εργασιών που ασχολούνται με το πρόβλημα σχεδιασμού έτσι όπως έχει διατυπωθεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Ακολούθησε η αναφορά στα λεωφορεία ταχείας τροχιάς (BRT) και στη δυναμική φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων και συγκεκριμένα των οχημάτων OLEV τα οποία χρησιμοποιεί η έρευνα για στο δίκτυο μελέτης. Εξετάστηκαν διαφορετικές προσεγγίσεις στην επίλυση του θέματος πάνω στις οποίες βασίστηκε αυτή η οποία παρουσιάζει η παρούσα μελέτη. Η διαφορά της προσέγγισης που παρουσιάζεται έγκειται στη δυναμική φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων, γεγονός που τη χαρακτηρίζει αυτομάτως λύση φιλική προς το περιβάλλον. Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό καθορίζει πολλούς από τους περιορισμούς του μοντέλου.

Εκτός από τα δεδομένα των χαρακτηριστικών του δικτύου, το μοντέλο ενισχύεται με τη συνεισφορά της κρίσης του μελετητή, εισάγοντας σε αυτό σαν δεδομένα εισόδου και προσχεδιασμένες γραμμές. Η εισαγωγή αυτή λαμβάνει υπόψη πολλούς παραμέτρους οι οποίοι είναι αδύνατον να προσεγγιστούν μαθηματικά. Επιπλέον, εξασφαλίζεται μεγάλο ποσοστό της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων καθώς αυτά δεν βασίζονται μόνο στις αποφάσεις ενός μοντέλου.

Το μοντέλο εφαρμόστηκε για την εξυπηρέτηση περιοχών της πόλης της Αθήνας. Έγινε προσπάθεια τα δεδομένα να είναι όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικά, καθώς η εύρεση ισχυουσών δεδομένων δεν ήταν εφικτή. Η επίλυση του μοντέλου έδειξε ότι πως το μοντέλο θα μπορούσε κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί από αρμόδιους φορείς για το

σχεδιασμό του συγκεκριμένου δικτύου, με την προϋπόθεση ότι τα δεδομένα θα είναι αληθή. Οι λύσεις που αποδίδει το μοντέλο φαίνεται να εξυπηρετούν τη ζήτηση που παρουσιάζει το δίκτυο λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη τους οικονομικούς περιορισμούς. Έτσι, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο αλγόριθμος αποδίδει λύσεις αποδεκτές που καλύπτουν σε λογικό βαθμό τις ανάγκες των επιβατών και των φορέων μεταφορών.

## **7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα**

### **7.2.1 Παραλλαγές στη διαμόρφωση του προβλήματος**

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος εξισώθηκε με το άθροισμα του συνολικού κόστους επένδυσης και τ της επιβατικής ζήτησης. Ο αριθμός των μεταβλητών μπορεί να αυξηθεί, εισάγοντας για παράδειγμα μεταβλητές που αφορούν τον αριθμό των στάσεων ή το χρόνο μετεπιβίβασης. Σχετικά με τους περιορισμούς θα μπορούσε να γίνει εισαγωγή ενός συγκεκριμένου αριθμού διαθεσιμότητας του στόλου οχημάτων ώστε ο αριθμός των οχημάτων που θα χρησιμοποιηθεί να μην τον ξεπερνά.

### **7.2.2 Παραλλαγές στον αλγόριθμο επίλυσης**

Το δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζει με επαρκή λεπτομέρεια τις διαφορετικές μεθοδολογίες και αλγορίθμους επίλυσης του προβλήματος. Η πλειοψηφία αυτών κάνουν χρήση ευρετικών ή μεταευρετικών μεθόδων, οι οποίες επιλύουν αποτελεσματικά τέτοιου είδους προβλήματα. Υπάρχουν και άλλες μεθοδολογίες που παρουσιάζουν πολλές προοπτικές και η περαιτέρω εξερεύνησή τους είναι σίγουρο ότι θα επιφέρει θεμιτά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να γίνει χρήση αλγορίθμου συντομότερης διαδρομής, ή να δημιουργηθεί αλγόριθμος που λαμβάνει υπόψη του άλλες παραμέτρους καθώς και λιγότερους ή περισσότερους περιορισμούς.

Επίσης, οι μετατροπές που μπορούν να εφαρμοστούν στον αλγόριθμο είναι αρκετές, ώστε να επιφέρουν λύσεις πιο αποτελεσματικές.

### **7.2.3 Προτάσεις για επέκταση του προβλήματος**

Ο τρόπος επίλυσης του προβλήματος παρουσιάζει μεγάλη ευελιξία. Αυτό σημαίνει ότι η εξέλιξη του για την κάλυψη αναγκών που θα προκύψουν στο μέλλον είναι εύκολη και με άμεσα αποτελέσματα.

Για αρχή το πρόβλημα επιλύθηκε για ένα δίκτυο 20 στάσεων και 20 μικρών προκατασκευασμένων γραμμών, παράγοντας 6 γραμμές σχεδιασμού. Η δομή του αλγορίθμου επιτρέπει τη λύση προβλημάτων μικρότερης αλλά και μεγαλύτερης τάξης μεγέθους με την κατάλληλη εισαγωγή δεδομένων εισόδου. Οι περιοχές επιλέχθηκαν δίνοντας προτεραιότητα σε περιοχές που στεγάζουν πανεπιστήμια, νοσοκομεία, σημεία τουριστικού ενδιαφέροντος καθώς και πυκνοκατοικημένους δήμους. Η συγκεκριμένη

έρευνα δεν έλαβε υπόψη περιοχές που ήδη εξυπηρετούνται από τις υπηρεσίες του μετρό. Μια λύση θα ήταν να προστεθούν περιοχές τέτοιου είδους για την εξυπηρέτηση επιβατών που επιθυμούν τη μετακίνησή τους με επίγεια μέσα ή ακόμα επιθυμούν να μεταφερθούν από ένα σημείο μετρό σε μια περιοχή η οποία δεν εξυπηρετείται από μετρό. Εν προκειμένω, δόθηκε προτεραιότητα σε περιοχές που παρουσιάζουν ζήτηση και δεν εξυπηρετούνται από το μετρό, προκειμένου να αποφευχθεί η εισαγωγή μεγάλου αριθμού περιοχών ενδιαφέροντος για την αποφυγή πολυπλοκότητας του αποτελέσματος, μιας και ο αλγόριθμος έγινε δοκιμαστικά για την απόδειξη εγκυρότητας των αποτελεσμάτων που παράγει. Επομένως το επόμενο βήμα θα ήταν καλό να κατευθυνθεί στην εισαγωγή και άλλων περιοχών ενδιαφέροντος.

Επιπρόσθετα, για την καλύτερη εξυπηρέτηση των επιβατών που πρόκειται να χρησιμοποιήσουν τα ηλεκτρικά λεωφορεία σταθερής τροχιάς για τις μετακινήσεις τους, θα ήταν εφικτή η αναζήτηση λύσεων για την αποτελεσματική ένωση των περιοχών. Αυτό συνεπάγεται τη σύνδεση των δρομολογίων των μέσων αυτών με τα ήδη υπάρχοντα μέσα του δικτύου, δηλαδή οι ώρες εξυπηρέτησης να συμπίπτουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο με τα συμβατικά λεωφορεία της γραμμής, προκειμένου οι ώρες μετεπιβίβασης να μην ξεπερνούν ένα λογικό χρονικό διάστημα.

Ακόμα θα μπορούσε να σχεδιαστεί το συγκεκριμένο δίκτυο για την κάλυψη της εξυπηρέτησης της ζήτησης σε ώρες που τα υπόλοιπα μέσα του δικτύου δεν λειτουργούν. Παρ' ότι πρόκειται για μέσα ταχείας τροχιάς και η λύση αυτή δεν φαντάζει ιδανική για αυτού του είδους τα μέσα, θα μπορούσε να προσφέρει έναν ελαττωμένο αριθμό δρομολογίων συγκριτικά με τα συμβατικά λεωφορεία, χωρίς όμως ταυτόχρονα να μειώνει το επίπεδο εξυπηρέτησης των επιβατών, καθώς έχουν την ευχέρεια να καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, γεγονός που δεν συμβαίνει με τα συμβατικά μέσα.





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Litman, T. and Burwell, D. Issues in sustainable transportation. *International Journal of Global Environmental Issues*, Vol. 6, No. 4, 2006, pp. 331-347.
2. Zhao, P. Sustainable urban expansion and transportation in a growing megacity: Consequences of urban sprawl for mobility on the urban fringe of Beijing. *Habitat International*, Vol. 34, No. 2, 2010, pp. 236-243.
3. Beltran, B., Carrese, S., Cipriani, E. and Petrelli, M.. Transit network design with allocation of green vehicles: A genetic algorithm approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 17, No. 5, 2009, pp.475-483.
4. Tzeng, G.H., Lin, C.W. and Opricovic, S.. Multi-criteria analysis of alternative-fuel buses for public transportation. *Energy Policy*, Vol. 33, No. 11, 2005, pp.1373-1383.
5. Fusco, G., Alessandrini, A., Colombaroni, C. and Valentini, M.P. A model for transit design with choice of electric charging system. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 87, 2013, pp.234-249.
6. Morita, K.. Automotive power source in 21st century. *JSAE review*, Vol. 24, No. 1, 2003, pp.3-7.
7. Suh, N. P.; Cho, D. H.; Rim, Chun T. Design of on-line electric vehicle (OLEV). In: *Global product development*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. pp. 3-8.
8. Pternea, M., Kepaptsoglou, K. and Karlaftis, M.G. Sustainable urban transit network design. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 77, 2015, pp.276-291.
9. Levinson, H., Zimmerman, S., Clinger, J., Rutherford, S., Smith, R.L., Cracknell, J. and Soberman, R., 2003. Bus rapid transit. *Transit Cooperative Research Program Report, 90*.
10. Chen Z, He F, Yin Y. Optimal deployment of charging lanes for electric vehicles in transportation networks. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2016, pp. 44-65.
11. Kepaptsoglou, K., M, Karlaftis. Transit route network design problem. *Journal of transportation engineering*, 2009, pp. 491-505.
12. Laporte, G., Laporte, G., Mesa, J.A., Ortega, F.A. and Perea, F. Planning rapid transit networks. *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol. 45, No. 3, 2011, pp. 95-104.
13. Dufourd, H., Gendreau, M. and Laporte, G. Locating a transit line using tabu search. *Location Science*, Vol. 4, No. 1, 1996, pp.1-19.
14. Bruno, G., Ghiani, G. and Improta, G. A multi-modal approach to the location of a rapid transit line. *European Journal of Operational Research*, Vol. 104, No. 2, 1998, pp.321-332.
15. Bruno, G., Gendreau, M. and Laporte, G., 2002. A heuristic for the location of a rapid transit line. *Computers & Operations Research*, Vol. 29, No. 1, 2002, pp. 1-12.
16. Laporte, G., J. A. Mesa, F.A. Ortega I. Sevillano. Maximizing trip coverage in the location of a single rapid transit alignment. *Annals of Operations Research*, 2005, pp. 49-63.
17. Laporte, G., Marín, Á., Mesa, J. and Ortega, F., 2007. An integrated methodology for the rapid transit network design problem. *Algorithmic methods for railway optimization*, 2007, pp. 187-199.

18. Laporte, G., Marín, A., Mesa, J.A. and Perea, F. Designing robust rapid transit networks with alternative routes. *Journal of advanced transportation*, 2011, pp. 54-65.
19. Sarker, A., Li, Z., Kolodzey, W. and Shen, H. Opportunistic Energy Sharing Between Power Grid and Electric Vehicles: A Game Theory-Based Pricing Policy. Presented at Distributed Computing Systems (ICDCS), 2017 IEEE 37th International Conference, San Diego, 2017.