



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ –
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
Τομέας Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης
Εργαστήριο Συγκοινωνιακής Τεχνικής

Διπλωματική Εργασία:

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΣΤΙΚΩΝ
ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΤΡΟΛΕΪ ΜΕ
ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ**

Ειρήνη Σταυροπούλου

Επιβλέπων:

Δρ. Κωνσταντίνος Κεπαπτσόγλου, Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Ιούνιος 2021



**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF RURAL, SURVEYING AND GEOINFORMATICS
ENGINEERING**

Department of Infrastructure and Rural Planning
Laboratory of Transportation

Diploma Thesis:

**DEVELOPMENT OF A MODEL FOR
OPTIMAL BATTERY ASSISTED
TROLLEYBUSES NETWORK DESIGN**

Eirini Stavropoulou

Supervisor:

Dr. Konstantinos Kepaptsoglou, Associate Professor

Athens, June 2021

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

Θα ήθελα αρχικά, να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Κ. Κεραπτσόγλου Κωνσταντίνο, τόσο για τη βοήθεια και το ενδιαφέρον του κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όσο και για την ευκαιρία που μου προσέφερε να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον και καινοτόμο αντικείμενο.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Μεταδιδακτορική Ερευνήτρια της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Κα. Χριστίνα Ηλιοπούλου για την πολύτιμη καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια και στους φίλους μου για την αμείωτη συμπαράσταση και την στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας αλλά και σε όλα τα φοιτητικά μου χρόνια.

*Education is the most powerful weapon which you can use to change the world. -
Nelson Mandela.*

Περίληψη

Με τα δεδομένα που υπάρχουν διαθέσιμα μέχρι σήμερα, μπορεί να γίνει εύκολα η υπόθεση ότι στο εγγύς μέλλον θα παρατηρηθεί σημαντική αύξηση στη δρομολόγηση ηλεκτρικών τρόλεϊ με συσσωρευτές (Battery Assisted Trolleybuses – BAT) για την μετατροπή των αστικών συγκοινωνιών σε φιλικότερες προς το περιβάλλον αλλά και πιο αποδοτικές. Η τεχνολογία των τρόλεϊ αυτών, συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του κλασικού τρόλεϊ με αυτά των λεωφορείων καθώς, ναι μεν φορτίζει εν κινήσει με το σύστημα In Motion Charging (IMC) από την υποδομή των εναέριων καλωδίων η οποία προϋπάρχει λόγω των συμβατικών τρόλεϊ μπορεί, όμως, να διανύσει και μεγάλα τμήματα της διαδρομής, χωρίς να συνδέεται στα εναέρια καλώδια, γεγονός που προσδίδει ελευθερία κινήσεων. Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει το πρόβλημα σχεδιασμού διαδρομών μέσω της βέλτιστης επιλογής υφιστάμενων λεωφορειακών γραμμών να αντικατασταθεί η λειτουργία τους από τα νέα τρόλεϊ με συσσωρευτές (BAT).

Λέξεις – Κλειδιά: Σχεδιασμός Δικτύου Διαδρομών Αστικών Συγκοινωνιών (TRNDP), Επιλογή Διαδρομών, Τρόλεϊ με συσσωρευτές (BAT), Φόρτιση εν κινήσει (IMC), Πρόβλημα Βελτιστοποίησης

Abstract

With the data available to date, it can easily be assumed that in the near future there will be a significant increase in the launch of Battery Assisted Trolleybuses (BATs) in order to make urban transport more environmentally friendly and more efficient. The technology of these trolleybuses combines the advantages of the classic trolley with those of the buses as, these trolleys not only charge on the move with the In Motion Charging (IMC) system from the overhead cable infrastructure which pre-exists due to the conventional trolleybuses but also they can travel large sections of the route, without being connected to the overhead cables, which gives freedom of movement. This diploma thesis examines the Transit Network Design Problem (TRNDP) through the optimal selection of existing bus lines to be replaced by new Battery Assisted Trolleybuses (BATs).

Keywords: Transit Route Network Design Problem (TRNDP), Route Selection, Battery Assisted Trolleybuses (BATs), In Motion Charging (IMC), Optimization Problem

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	18
1.1 Το Πρόβλημα Σχεδιασμού Δικτύου Διαδρομών Αστικών Συγκοινωνιών για τα Τρόλεϊ με Συσσωρευτές	18
1.2 Ερευνητικός Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας	21
1.3 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ & ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	23
2.1 Εισαγωγή	23
2.2 Σχεδιασμός Δικτύου Διαδρομών.....	23
2.2.1 Εισαγωγή	23
2.2.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	25
2.3 Τρόλεϊ με Συσσωρευτές (Battery Assisted Trolleybus – BAT)	31
2.3.1 Όχημα	31
2.3.2 Μπαταρία	32
2.3.3 Εναέρια Καλώδια.....	34
2.3.4 Πόλοι.....	35
2.3.5 Σύγκριση με Ηλεκτρικά Λεωφορεία	36
2.3.6 Σύγκριση με Συμβατικά Τρόλεϊ	37
2.3.7 Σύγκριση με Τραμ	37
2.4 Δυναμική Φόρτιση – Φόρτιση Εν Κινήσει (IMC)	38
2.4.1 Γενικά.....	38
2.4.2 Πλεονεκτήματα και Δυσκολίες	40
2.4.3 Επιτυχημένα Παραδείγματα Εφαρμογής του IMC σε Διάφορες Πόλεις.....	42
2.4.4 Σύγκριση με την Ευκαιριακή Φόρτιση.....	47
2.5 Σύνοψη	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΠΙΛΥΣΗΣ	50
3.1 Γενικά Στοιχεία	50
3.2 Λογική Διαμόρφωσης Μαθηματικού Μοντέλου	50
3.3 Δεδομένα και Συμβολισμοί.....	51
3.4 Προ – επεξεργασία Δεδομένων	53
3.5 Μεταβλητή Απόφασης.....	54
3.6 Μαθηματικό Μοντέλο.....	55
3.6.1 Αντικειμενική Συνάρτηση	55

3.6.2 Περιορισμοί	56
3.7 Σύνοψη	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ.....	60
4.1 Εισαγωγή	60
4.2 Δεδομένα Προβλήματος	60
4.3 Παραδοχές.....	66
4.4 Περιβάλλον Επίλυσης.....	67
4.5 Σύνοψη	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	70
5.1 Εισαγωγή	70
5.2 Επιλογή Παραμέτρων.....	70
5.2.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Σεναρίου 0	71
5.2.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Σεναρίου 1 – Έμφαση στο Περιβάλλον.....	73
5.2.3 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Σεναρίου 2 – Έμφαση στο Κόστος.....	75
5.2.4 Σύγκριση Αποτελεσμάτων των Τριών Σεναρίων	76
5.3 Ανάλυση Ευαισθησίας.....	78
5.4 Σύνοψη	83
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	84
6.1 Εισαγωγή	84
6.2 Ανασκόπηση του Προβλήματος	84
6.3 Συμπεράσματα	85
6.4 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	88
Παράρτημα: Κώδικας	90

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1: Η ιδέα του συστήματος φόρτισης εν κινήσει IMC [Vossloh Kiepe] [Bartłomiejczyk (2017)]	19
Σχήμα 2: Πραγματική εικόνα από την Αθήνα όπου λεωφορειακή γραμμή ταυτίζεται με γραμμή τρόλεϊ.....	20
Σχήμα 3: Ταξινόμηση των μεθοδολογιών για το πρόβλημα "TRNDP"	25
Σχήμα 4: Το νέας τεχνολογίας τρόλεϊ με μπαταρία (BAT) [trolley:motion, E-Bus-Systems] .	32
Σχήμα 5: Απεικόνιση των βασικών εξαρτημάτων του τρόλεϊ με μπαταρία [Ritter et al. (2016)]	33
Σχήμα 6: Τομή εναέριων καλωδίων τρόλεϊ [Wikiwand]	34
Σχήμα 7: Τα εναέρια καλώδια τρόλεϊ στην Αθήνα	35
Σχήμα 8: Οι πόλοι του τρόλεϊ με μπαταρία [TROLLEY project - UITP]	36
Σχήμα 9: Το τρόλεϊ με μπαταρία στην Πράγα [Sustainable Bus]	42
Σχήμα 10: Το τρόλεϊ με μπαταρία στην Αγία Πετρούπολη [Urban Transport Magazine]	43
Σχήμα 11: Το τρόλεϊ με μπαταρία στην Γκντύνια [trolley:motion, E-Bus-Systems]	44
Σχήμα 12: Το τρόλεϊ με μπαταρία στο Σόλινγκεν [Sustainable Bus]	45
Σχήμα 13: Το τρόλεϊ με μπαταρία στο Φρίμπουργκ [Sustainable Bus]	46
Σχήμα 14: Το τρόλεϊ με μπαταρία στη Γενεύη [TPG Bus Trolley VanHool EquiCity].....	47
Σχήμα 15: Συγκριτική σχηματική απεικόνιση της ευκαιριακής και της εν κινήσει φόρτισης [PKT Gdynia]	48
Σχήμα 16: Η λογική διαμόρφωσης του μαθηματικού μοντέλου	51
Σχήμα 17: Τυπική Μορφή Λογισμικού "GIS"	54
Σχήμα 18: Το Υπό Μελέτη Λεωφορειακό Δίκτυο της Αθήνας	62
Σχήμα 19: Πίνακας Περιβαλλοντικών Τιμών για τις εκπομπές στην ατμόσφαιρα (€/kg)	65
Σχήμα 20: Πίνακας Περιβαλλοντικών Τιμών ανά κατηγορία επίπτωσης στο περιβάλλον (€/kg)	65
Σχήμα 21: Απόσπασμα Πίνακα Υπολογισμού Τελικών Μηκών και Ποσοστών Κάλυψης έπειτα της παραδοχής	67
Σχήμα 22: Τυπική μορφή περιβάλλοντος "Open Solver"	67
Σχήμα 23: Τυπική μορφή προγραμματιστικού περιβάλλοντος "Spyder"	68
Σχήμα 24: Χαρτογραφική Απεικόνιση Αποτελέσματος Σεναρίου 0.....	72
Σχήμα 25: Χαρτογραφική Απεικόνιση Αποτελέσματος Σεναρίου 1.....	74
Σχήμα 26: Χαρτογραφική Απεικόνιση Αποτελέσματος Σεναρίου 2.....	76
Σχήμα 27: Σύγκριση Αποτελεσμάτων Σεναρίων μέσω Γραφήματος	77
Σχήμα 28: Ανάλυση Ευαισθησίας για την παράμετρο Y_{min}	79
Σχήμα 29: Ανάλυση Ευαισθησίας για την παράμετρο BC	80
Σχήμα 30: Ανάλυση Ευαισθησίας για την παράμετρο P_{max}	81
Σχήμα 31: Ανάλυση Ευαισθησίας για την Παράμετρο $P_{totalmax}$	82

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Χρόνοι Φόρτισης ανά Μήκος Οχήματος [PKT Gdynia]	48
Πίνακας 2: Συμβολισμός και Περιγραφή Παραμέτρων Μαθηματικού Μοντέλου	52
Πίνακας 3: Συμβολισμός και Περιγραφή Μεταβλητής Απόφασης Μαθηματικού Μοντέλου	54
Πίνακας 4: Οι υπό εξέταση λεωφορειακές γραμμές του δικτύου της Αθήνας	61
Πίνακας 5: Μήκη Λεωφορειακών Γραμμών και Ποσοστά Κάλυψης από Εναέρια Καλώδια .	62
Πίνακας 6: Συντελεστές εκπομπών CO ₂ ανά τύπο οχήματος	64
Πίνακας 7: Τιμές υπόλοιπων παραμέτρων	66
Πίνακας 8: Αρχικές τιμές παραμέτρων	70
Πίνακας 9: Βάρη Σεναρίου 0	71
Πίνακας 10: Αποτελέσματα Σεναρίου 0.....	72
Πίνακας 11: Βάρη Σεναρίου 1	73
Πίνακας 12: Αποτελέσματα Σεναρίου 1.....	73
Πίνακας 13: Βάρη Σεναρίου 2	75
Πίνακας 14: Αποτελέσματα Σεναρίου 2.....	75
Πίνακας 15: Ανάλυση Ευαισθησίας για την παράμετρο Y_{min}	78
Πίνακας 16: Ανάλυση Ευαισθησία για την παράμετρο BC.....	79
Πίνακας 17: Ανάλυση Ευαισθησίας για την παράμετρο P_{max}	81
Πίνακας 18: Ανάλυση Ευαισθησίας για την Παράμετρο $P_{totalmax}$	82

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Το Πρόβλημα Σχεδιασμού Δικτύου Διαδρομών Αστικών Συγκοινωνιών για τα Τρόλεϊ με Συσσωρευτές

Οι σύγχρονες πόλεις, όπως έχουν διαμορφωθεί και λειτουργούν μέχρι σήμερα, αποτελούν σημεία συσσώρευσης σημαντικού αριθμού δραστηριοτήτων, οι οποίες παράγουν επιθυμίες και ανάγκες για μετακινήσεις. Οι περισσότερες από τις μετακινήσεις αυτές, οι οποίες είναι πολυάριθμες, οφείλουν να γίνονται με τη χρήση της δημόσιας αστικής συγκοινωνίας. Για το λόγο αυτό, πρέπει να υπάρχουν συστήματα συγκοινωνίας, ελκυστικά προς τους κατοίκους αλλά και φιλικά προς το περιβάλλον. Με άλλα λόγια, ο σχεδιασμός των δικτύων αστικής συγκοινωνίας οφείλει να ανταποκρίνεται όσο το δυνατόν περισσότερο στη ζήτηση για μετακίνηση, προκειμένου να αξιοποιηθούν τα οφέλη των μαζικών μεταφορών.

Όσον αφορά το περιβάλλον, οι μεταφορές αποτελούν βασική πηγή περιβαλλοντικών πιέσεων στην Ευρωπαϊκή Ένωση και συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή, την ατμοσφαιρική ρύπανση και τον θόρυβο. Η Ευρωπαϊκή Ένωση, συγκεκριμένα, λόγω της διευρυνόμενης κλιματικής αλλαγής του πλανήτη, ζητά πλέον τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλούνται από τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Στην επίτευξη του στόχου αυτού, κομβικό ρόλο θα διαδραματίσει η εισαγωγή ηλεκτρικών οχημάτων με μηδενικό ή μειωμένο αποτύπωμα άνθρακα ακόμη και στις δημόσιες συγκοινωνίες. Παρατηρείται ότι στις πόλεις, είναι πολλά τα οχήματα που χρησιμοποιούν ακόμα ορυκτά καύσιμα. Σε μια πρώτη προσπάθεια απαλλαγής από αυτά τα οχήματα πολλές είναι οι μητροπόλεις εκείνες που εφαρμόζουν ζώνες μηδενικών εκπομπών αερίων στην καρδιά των πόλεων.

Η στρατηγική που εξέδωσε η Ευρωπαϊκή Επιτροπή το 2018 «Καθαρός πλανήτης για όλους: Ένα ευρωπαϊκό, στρατηγικό, μακρόπνοο όραμα για μια ευημερούσα, σύγχρονη, ανταγωνιστική και κλιματικά ουδέτερη οικονομία» επιδιώκει να χαράξει την πορεία μετάβασης προς μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε ολόκληρη την Ε.Ε. έως το 2050. Όσον αφορά τις μεταφορές, υπογραμμίζεται η ανάγκη συστηματικής προσέγγισης, τονίζεται η σημασία της στροφής σε τρόπους μεταφοράς με χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και σε οχήματα μηδενικών εκπομπών, υπογραμμίζεται ο κεντρικός ρόλος του εξηλεκτρισμού και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και επισημαίνεται η ανάγκη βελτίωσης της λειτουργικής απόδοσης.

Εστιάζοντας στην ηλεκτροκίνηση, η οποία αποτελεί έναν από τους βασικότερους πυλώνες για το μέλλον των αστικών συγκοινωνιών είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι η αυτονομία των λεωφορείων συνεχώς βελτιώνεται

και το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα είναι σχεδόν μηδενικό. Ωστόσο, παρά τη συνεχή ανάπτυξη της τεχνολογίας μπαταριών και το πλήθος των ηλεκτρικών λεωφορείων που προσφέρονται, εξακολουθεί να μην είναι δυνατή η εκμετάλλευση αυτών, στις αστικές συγκοινωνίες, σε ολόκληρη βάση χωρίς την ανάγκη φόρτισης είτε ταχείας είτε ολονύκτιας. Για το σκοπό αυτό, είναι απαραίτητο να δημιουργηθούν σταθμοί φόρτισης στις ενδιάμεσες στάσεις των διαδρομών ή ακόμα και στους τερματικούς σταθμούς. Αυτό επιφέρει σημαντικές οικονομικές δαπάνες αλλά και χρονικές καθυστερήσεις στη λειτουργία των ηλεκτρικών λεωφορείων.

Μια ενδιαφέρουσα αλλά ανεξερεύνητη, προς το παρόν, προσέγγιση είναι η χρήση τεχνολογίας τρόλεϊ με συσσωρευτές – Battery Assisted Trolleybuses (BATs). Αυτή η τεχνολογία συνδυάζει τα πλεονεκτήματα ενός κλασικού τρόλεϊ με αυτά ενός ηλεκτρικού λεωφορείου. Υπάρχουν οικονομικές μελέτες που ισχυρίζονται ότι η μερική χρήση των τρόλεϊ αυτών, είναι πιο συμφέρουσα από τις διαθέσιμες μέχρι σήμερα πράσινες τεχνολογίες [Bartłomiejczyk (2017)]. Στο Σχήμα 1 απεικονίζεται σε σχέδιο η ιδέα του συστήματος φόρτισης που χρησιμοποιούν τα νέας τεχνολογίας τρόλεϊ.



Σχήμα 1: Η ιδέα του συστήματος φόρτισης εν κινήσει IMC [Vossloh Kiepe] [Bartłomiejczyk (2017)]

Το πρόβλημα που αντιμετωπίζει η παρούσα εργασία είναι το γνωστό πρόβλημα «Σχεδιασμός Δικτύου Διαδρομών Αστικών Συγκοινωνιών» (Transit Route Network Design Problem – TRNDP). Το πρόβλημα, ουσιαστικά, αναφέρεται στο

σχεδιασμό διαδρομών δημόσιας συγκοινωνίας που θα λειτουργούν από τα υποβοηθούμενα από μπαταρία τρόλεϊ, τα οποία θα φορτίζουν εν κινήσει, σε ορισμένα μόνο τμήματα της διαδρομής τους και όχι καθ' όλη τη διάρκεια αυτής. Συγκεκριμένα, γίνεται επιλογή κάποιων λεωφορειακών γραμμών, από τις ήδη υπάρχουσες οι οποίες μάλιστα ταυτίζονται με τις γραμμές τρόλεϊ σε κάποια τμήματά τους, να πραγματοποιηθεί η αντικατάσταση των ντιζελοκίνητων λεωφορείων που τις λειτουργούν από τα νέα οχήματα τρόλεϊ (BAT). Η βέλτιστη αυτή επιλογή γραμμών γίνεται με σκοπό τη μέγιστη μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που απελευθερώνουν τα υπάρχοντα λεωφορεία σε συνδυασμό με την ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης. Στο Σχήμα 2 φαίνεται ένα μικρό κομμάτι της οδού Πατησίων στην Αθήνα όπου λεωφορειακή γραμμή ταυτίζεται με γραμμή κλασικού τρόλεϊ.



Σχήμα 2: Πραγματική εικόνα από την Αθήνα όπου λεωφορειακή γραμμή ταυτίζεται με γραμμή τρόλεϊ

1.2 Ερευνητικός Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου το οποίο θα επιλέγει τις λεωφορειακές γραμμές, εκείνες, που συμφέρει, από περιβαλλοντική και οικονομική άποψη, να αντικατασταθούν τα ντιζελοκίνητα λεωφορεία που τις λειτουργούν από τα νέα τρόλεϊ με μπαταρία. Αυτά, τα φιλικά προς το περιβάλλον οχήματα, θα εκτελούν τη διαδρομή των ντιζελοκίνητων λεωφορείων με την ίδια συχνότητα και θα αντλούν ρεύμα από τα τμήματα του δρόμου που τυχαίνει να συμπίπτουν με τις υπάρχουσες εναέρια γραμμές συμβατικών τρόλεϊ. Τα τρόλεϊ που κάνουν χρήση της μπαταρίας του, επιτρέπουν την αντικατάσταση των ντιζελ λεωφορείων έχοντας ανάγκη να περάσουν μόνο από ένα μικρό κομμάτι κάτω από εναέρια καλώδια. Βασικός περιορισμός του προβλήματος είναι η βέλτιστη διαχείριση της ενέργειας.

1.3 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 7 κεφάλαια και είναι δομημένη ως εξής:

- **Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή:** Αποτελεί το εισαγωγικό κεφάλαιο της εργασίας, στο οποίο γίνεται μια συνοπτική περιγραφή του προβλήματος που εξετάζεται και ο στόχος αυτής.
- **Κεφάλαιο 2 – Βιβλιογραφική Ανασκόπηση & Θεωρητικό Υπόβαθρο:** Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται, αρχικά, μια εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση για το πρόβλημα του «Σχεδιασμού Δικτύου Διαδρομών Αστικών Συγκοινωνιών» (TRNDP) και στη συνέχεια, παρουσιάζεται θεωρητικό υπόβαθρο και πληροφορίες για τα νέα τρόλεϊ με μπαταρία που μελετώνται (Battery Assisted Trolleybuses – BAT) καθώς, και για το σύστημα φόρτισης που χρησιμοποιούν, δηλαδή το σύστημα φόρτισης εν κινήσει (In Motion Charging – IMC).
- **Κεφάλαιο 3 – Διαμόρφωση Μαθηματικού Μοντέλου Επίλυσης:** Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο που διαμορφώθηκε με σκοπό την επίλυση του υπό εξέταση προβλήματος. Αναλύονται, δηλαδή, η αντικειμενική συνάρτηση αλλά και οι περιορισμοί που διαμορφώθηκαν προκειμένου να επιλεγούν οι βέλτιστες διαδρομές που θα αντικατασταθούν από τα νέα τρόλεϊ με μπαταρία (BAT). Επίσης, γίνεται παρουσίαση των δεδομένων και των παραμέτρων που δέχεται το μοντέλο και του συμβολισμού αυτών.

Τέλος, περιγράφεται και η προεπεξεργασία που απαιτείται να γίνει στα δεδομένα για την χρήση αυτών στο μοντέλο.

- **Κεφάλαιο 4 – Εφαρμογή Αλγορίθμου:** Στο κεφάλαιο αυτό, πραγματοποιείται η εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου στο δίκτυο της Αθήνας με σκοπό να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητά του. Το κεφάλαιο περιλαμβάνει την παρουσίαση του δικτύου που χρησιμοποιήθηκε, τις παραδοχές που έγιναν αλλά και το προγραμματιστικό περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή του αλγορίθμου και κατά επέκταση η επίλυση του προβλήματος.
- **Κεφάλαιο 5 – Αποτελέσματα:** Στο πέμπτο κεφάλαιο, γίνεται παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν, έπειτα από την εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου. Στην αρχή, γίνεται επιλογή των αρχικών τιμών για τις παραμέτρους του μοντέλου και παρουσίαση των αποτελεσμάτων για τρία πιθανά σενάρια που προκύπτουν από τη μεταβολή των βαρών στην αντικειμενική συνάρτηση. Έπειτα, γίνεται ανάλυση ευαισθησίας στην οποία γίνονται διάφορες μεταβολές στις τιμές των παραμέτρων με σκοπό να διερευνηθεί ο βαθμός στον οποίο επιδρούν οι παράμετροι στο τελικό αποτέλεσμα. Τέλος, τα αποτελέσματα συνοψίζονται και εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα.
- **Κεφάλαιο 6 – Επίλογος:** Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται μια συνοπτική ανασκόπηση των στόχων του προτύπου επίλυσης που αναπτύχθηκε, αλλά και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή του αλγορίθμου. Τέλος, διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα και μελλοντική εξέλιξη της παρούσας διπλωματικής εργασίας.
- **Κεφάλαιο 7 – Βιβλιογραφία:** Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η λίστα με τη βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε κατά τη μελέτη και συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ & ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται, αρχικά, βιβλιογραφική ανασκόπηση για το πρόβλημα του «Σχεδιασμού Δικτύου Διαδρομών Αστικών Συγκοινωνιών» (TRNDP). Στη συνέχεια, δίνονται σημαντικές πληροφορίες που αφορούν τα οχήματα που μελετά η παρούσα εργασία και τέλος, για το σύστημα φόρτισης που θα χρησιμοποιούν.

2.2 Σχεδιασμός Δικτύου Διαδρομών

2.2.1 Εισαγωγή

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. Η δυσκολία αλλά και η πρόκληση αυτών των συστημάτων είναι η ενδογενής πολυπλοκότητά τους, που επιτείνεται από το γεγονός ότι ο χρονικός ορίζοντας του σχεδιασμού των υποδομών εκτείνεται αρκετές δεκαετίες στο μέλλον [Καρλαύτης και Σταθόπουλος (2016)].

Ένας απλός αλλά βασικός κανόνας που ακολουθείται στο σχεδιασμό δικτύων μπορεί να διατυπωθεί με την παρακάτω αντικειμενική συνάρτηση:

$$\text{Max} \{ \text{Συνολικά οφέλη} - \text{Συνολικά κόστη} \}$$

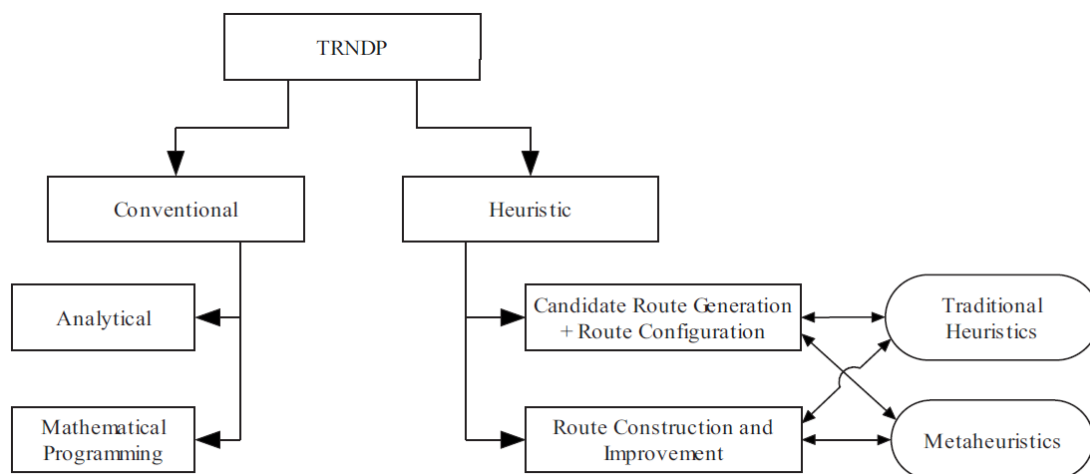
Η συνάρτηση αυτή δηλώνει, ότι ο σχεδιασμός επιδιώκει την ταυτόχρονη μεγιστοποίηση του οφέλους (π.χ. εξυπηρέτηση της ζήτησης, εκπομπών CO₂ που εξοικονομούνται) με την ελαχιστοποίηση του κόστους (π.χ. κόστος υποδομής, λειτουργικό κόστος κ.α.).

Ο σχεδιασμός σήμερα, θα πρέπει να εστιάσει στην αναβάθμιση των υπηρεσιών που παρέχει η αστική συγκοινωνία διότι είναι ζωτικής σημασίας, καθώς τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται κατά μεγάλο ποσοστό μια στροφή προς τα ιδιωτικά οχήματα και μια μείωση της χρήσης των δημόσιων μεταφορών για τις καθημερινές κυρίως μετακινήσεις. Όπως άλλωστε είναι γνωστό, αναπτυγμένη είναι η χώρα εκείνη στην οποία οι άνθρωποι όλων των οικονομικών βαθμίδων χρησιμοποιούν τα μέσα μαζικής μεταφοράς και όχι η χώρα η οποία έχει μεγάλο, σε αριθμό, στόλο ιδιωτικών οχημάτων.

Οι προσπάθειες για την ενθάρρυνση της χρήσης των μέσων μαζικής μεταφοράς επικεντρώνονται στη βελτίωση των παρεχόμενων υπηρεσιών, όπως η χωρητικότητα γραμμής, η συχνότητα των υπηρεσιών, η κάλυψη, η αξιοπιστία, η άνεση και η ποιότητα των υπηρεσιών που είναι από τις πιο σημαντικές παραμέτρους για ένα αποτελεσματικό σύστημα δημόσιων μεταφορών [Sinha (2003), Vuchic (2004)].

Σε αυτό το πλαίσιο, ο σχεδιασμός ενός αποδοτικού, σε κόστος και υπηρεσίες, δικτύου δημόσιων μεταφορών είναι απαραίτητος για τη βελτίωση της ανταγωνιστικότητας του. Το πρόβλημα που περιγράφει το σχεδιασμό ενός τέτοιου δικτύου δημόσιων συγκοινωνιών αναφέρεται στη βιβλιογραφία με τον όρο “Transit Route Network Design Problem” (TRNDP). Επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση ορισμένων στόχων που αντιπροσωπεύουν την αποτελεσματικότητα των δικτύων δημόσιας συγκοινωνίας υπό ορισμένους λειτουργικούς και χρηματικούς περιορισμούς όπως, ο αριθμός και το μήκος των διαδρομών δημόσιας μεταφοράς, οι επιτρεπόμενες συχνότητες εξυπηρέτησης και ο αριθμός των διαθέσιμων λεωφορείων [Chakroborty (2003), Fan and Machemehl (2006 a, b)].

Από τη βιβλιογραφία φαίνεται ότι υπάρχει μια ποικιλία στις μεθοδολογίες που αφορούν τη διαμόρφωση και επίλυση του προβλήματος “TRNDP”. Γενικά, τέτοιες μεθοδολογίες ταξινομούνται σε δύο ευρείες κατηγορίες: στις αναλυτικές (analytical) και στις ευρετικές (heuristic) [Baaj και Mahmassani (1991), Chakroborty και Dwivedi (2002)]. Ωστόσο, η μελέτη των [Keraptsoglou and Karlaftis (2009)] ταξινομούν τις μεθοδολογίες στις εξής κατηγορίες: στις συμβατικές (conventional) και στις ευρετικές (heuristic) με καθεμία να διαθέτει και υποκατηγορίες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Ταξινόμηση των μεθοδολογιών για το πρόβλημα "TRNDP"

2.2.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Από τις αρχές της δεκαετίας του 1960, αρκετές μελέτες έχουν διερευνήσει το πρόβλημα του σχεδιασμού δικτύων λεωφορείων, υιοθετώντας μια ποικιλία σχεδιαστικών στόχων και μεθοδολογικών εργαλείων. [Keraptsoglou and Karlaftis (2009)].

Στο άρθρο των **Ceder & Wilson (1985)** περιγράφεται το πρόβλημα σχεδιασμού δικτύου λεωφορείων, συνοψίζονται οι διάφορες προσεγγίσεις που έχουν προταθεί για τη λύση του μέχρι εκείνη την εποχή και προτείνεται μια νέα προσέγγιση. Παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό νέων διαδρομών λεωφορείων λαμβάνοντας υπόψη το συμφέρον τόσο των επιβατών, όσο και των διαχειριστών. Συγκεκριμένα, διαμορφώθηκε αρχικά το επίπεδο I (αντικειμενική συνάρτηση και περιορισμοί), λαμβάνοντας υπόψη μόνο τους επιβάτες, στη συνέχεια το επίπεδο II το οποίο λαμβάνει υπόψη τις επιπτώσεις τόσο στους επιβάτες όσο και στη λειτουργία και τέλος, αναπτύχθηκε ο αλγόριθμος για την κατασκευή εφικτών διαδρομών λεωφορείων. Στο άρθρο αυτό επισημαίνεται ότι τα μοντέλα και οι αλγόριθμοι που προτείνονται είναι αρκετά απλοί και δεν περιλαμβάνουν όλους τους περιορισμούς και τους στόχους που θα χρειαζόταν μια διαδικασία επιχειρησιακής έρευνας.

Οι **Bruno et al. (1996)** σημείωσαν ότι η επιχειρησιακή έρευνα μπορεί να βοηθήσει στη διαδικασία σχεδιασμού, παρέχοντας εργαλεία για τη δημιουργία και αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων. Η επιχειρησιακή έρευνα βοηθάει διότι, η χωροθέτηση μιας γραμμής ταχείας διαμετακόμισης (Rapid Transit Line – RTL) είναι ένα πολύ περίπλοκο πρόβλημα λόγω του μεγάλου αριθμού των μεταβλητών απόφασης, των μη προσδιορισμένων κριτηρίων και των αβέβαιων δεδομένων. Σε

αυτό το άρθρο περιγράφεται ένα νέο μοντέλο δύο κριτηρίων, το οποίο μπορεί να αξιολογήσει με πιο ρεαλιστικό τρόπο την ελκυστικότητα μιας γραμμής λεωφορείου. Το μοντέλο αντιπροσωπεύει ένα πρώτο θεμελιώδες βήμα στο σχεδιασμό ενός συστήματος λήψης αποφάσεων ικανό να δώσει μια πιο ρεαλιστική αξιολόγηση όσον αφορά το κόστος και τα οφέλη των διαφόρων γραμμών.

Οι **Bruno, Gendreau & Laporte (2000)** παρουσίασαν σε άρθρο τους ένα μαθηματικό μοντέλο και ένα ευρετικό δύο φάσεων τα οποία βοηθούν στη χωροθέτηση μιας γραμμής ταχείας διαμετακόμισης (Rapid Transit Line – RTL) σε αστικό περιβάλλον. Αυτή η μέθοδος μπορεί να αποτελέσει δομικό στοιχείο για το πρόβλημα σχεδιασμού δικτύου πολλαπλών γραμμών, μπορεί δηλαδή, να ενσωματωθεί σε μια πιο γενική προσέγγιση για περισσότερο σύνθετα προβλήματα σχεδιασμού δικτύου. Τα εργαλεία βελτιστοποίησης, όπως αυτά που αναπτύχθηκαν σε αυτό το άρθρο, δηλώνουν οι συγγραφείς πως δεν θα πρέπει να θεωρούνται υποκατάστατα της ορθής κρίσης των μηχανικών. Ωστόσο, μπορούν να βοηθήσουν στη διαδικασία λήψης αποφάσεων δημιουργώντας γρήγορα μια ομάδα καλών σεναρίων. Παραδείγματος χάρη, σε προβλήματα πολλαπλών κριτηρίων όπως αυτό, είναι πολύτιμο να δημιουργηθεί ένας μεγάλος αριθμός λύσεων υψηλής ποιότητας και η επιλογή μιας εκ των λύσεων στη συνέχεια, θα πρέπει να γίνεται από τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων.

Τον επόμενο χρόνο, οι **Viswanath & Peeta (2002)** παρουσίασαν λύση στο λεγόμενο πρόβλημα Multicommodity Maximal Covering Network Design Problem – MCNDP. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος που δημιουργήθηκε αναζητά διαδρομές οι οποίες ελαχιστοποιούν το συνολικό κόστος ανάμεσα από τις επιλεγμένες και μεγιστοποιούν την κάλυψη της συνολικής ζήτησης, υπό τον περιορισμό του διαθέσιμου επενδυτικού προϋπολογισμού. Αυτό είναι χρήσιμο και στον σχεδιασμό, για την αντιμετώπιση και διαχείριση καταστροφών σε επίπεδο δικτύου. Θα μπορούσε, δηλαδή, να εφαρμοστεί σε δίκτυα κυκλοφορίας οχημάτων, στη μεταφορά εμπορευμάτων, στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών, στο σχεδιασμό αλυσίδας εφοδιασμού αλλά ακόμα και στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Γενικά, τα μοντέλα μέχρι τότε, είχαν επικεντρωθεί κυρίως στην ελαχιστοποίηση του κόστους και δεν λάμβαναν υπόψη άλλα σημαντικά κριτήρια όπως, η κάλυψη του πληθυσμού, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τα έσοδα. Έτσι, το MCNDP έθεσε ως στόχο να ελαχιστοποιήσει το συνολικό κόστος δρομολόγησης για ένα σύνολο ζευγών Προέλευσης – Προορισμού, διαθέτοντας έναν περιορισμένο προϋπολογισμό σε συνδέσμους, και ταυτόχρονα να μεγιστοποιήσει την συνολική ζήτηση που καλύπτεται από τις διαδρομές.

Έπειτα, ο **Chakraborty (2003)** επιχειρεί με το άρθρο του να υπογραμμίσει την αποτελεσματικότητα των γενετικών αλγορίθμων (GA) – διαδικασίες που βασίζονται στην επίλυση του προβλήματος σχεδιασμού δικτύων αστικών συγκοινωνιών (Urban Transit Network Design Problem – UTNDP). Η ουσία του άρθρου είναι τριπλή. Πρώτον, επιχειρεί να δείξει την αποτελεσματικότητα των

γενετικών αλγορίθμων (GA) στην επίλυση του UTNDP. Δεύτερον, επιχειρεί να εντοπίσει χαρακτηριστικά του UTNDP που το καθιστούν ένα δύσκολο πρόβλημα στη λύση του με τις παραδοσιακές τεχνικές και τρίτον, προτείνει οδηγίες, μέσω της παρουσίασης μεθοδολογιών GA για το UTNDP, για την ανάπτυξη διαδικασιών για την επίλυση άλλων προβλημάτων βελτιστοποίησης με χαρακτηριστικά παρόμοια του προβλήματος αυτού.

Οι **Laporte et al. (2011)** στο άρθρο τους, εξέτασαν μερικούς δείκτες για την ποιότητα ενός δικτύου ταχείας διέλευσης, καθώς και μαθηματικά και ευρετικά μοντέλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο πρόβλημα του σχεδιασμού δικτύων. Για διάφορους λόγους, η επιχειρησιακή έρευνα δεν έπαιξε σημαντικό ρόλο σε προσπάθειες κατασκευής νέων δικτύων ή επέκτασης των υπαρχόντων, αν και αρκετά εργαλεία που αναπτύχθηκαν στο διάστημα 1996 με 2011 περίπου, μπορούν να βοηθήσουν τη διαδικασία σχεδιασμού παρέχοντας δείκτες για τη μέτρηση της ποιότητας ενός δικτύου ή μαθηματικά μοντέλα ικανά να προτείνουν νέο σχεδιασμό. Τέτοια μοντέλα συνήθως περιέχουν πολύ μεγάλο αριθμό ακέραιων μεταβλητών και περιορισμών. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας αριθμός ευρετικών αλγορίθμων που βασίζονται σε κλασικές διαδικασίες κατασκευής και βελτίωσης ή σε προηγμένα τοπικά πρότυπα αναζήτησης, αντί για ακριβείς αλγόριθμους για την παραγωγή λύσεων υψηλής ποιότητας. Κατά κανόνα, είναι αρκετά ευέλικτοι και μπορούν να ενσωματώσουν μη γραμμικούς περιορισμούς που δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν από ακριβείς αλγόριθμους.

Το ίδιο διάστημα οι **Curtin & Biba (2011)** παρουσίασαν μια νέα μέθοδο (TRANSMax) για τον προσδιορισμό των βέλτιστων διαδρομών διέλευσης, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η ποιότητα της υπηρεσίας. Το μοντέλο Transit Route Arc-Node Service Maximization (TRANSMax) είναι ένα μαθηματικό μοντέλο που μεγιστοποιεί την ποιότητα της υπηρεσίας μιας διαδρομής αλλά δεν ελαχιστοποιεί το κόστος. Το κόστος (δηλαδή η απόσταση στην συγκεκριμένη περίπτωση) λαμβάνεται ως περιορισμός, ανάλογα με το μέγεθος της διαδρομής. Το μαθηματικό μοντέλο δημιουργήθηκε με την τροποποίηση και εκμετάλλευση της δομής των προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού που είχαν σχεδιαστεί για το πρόβλημα του ταξιδιώτη – πωλητή. Παρουσιάστηκε, λοιπόν, μια καινοτόμα διαδικασία λύσης που ακολουθεί τη λογική του «διαίρει και βασίλευε» η οποία, όχι μόνο κατέστησε το πρόβλημα δρομολόγησης διαχειρίσιμο, αλλά έδωσε επίσης, μια σειρά εναλλακτικών διαδρομών υψηλής ποιότητας για εξέταση, μερικές από τις οποίες είχαν τελείως διαφορετικές γεωμετρίες. Όσον αφορά την ποιότητα των υπηρεσιών, αυτή μπορεί να είναι συναρτημένη του πληθυσμού, των ευκαιριών για εργασία και άλλων μέτρων ελκυστικότητας των διαδρομών, δεδομένης της πρόσβασης του πληθυσμού στη διαδρομή των λεωφορείων. Οι **Curtin & Biba (2011)** με το άρθρο τους αυτό, εξήγαγαν δύο πολύ σημαντικά συμπεράσματα. Πρώτον, τα αποτελέσματα φανέρωσαν ότι το αυξημένο κόστος διαδρομής δεν συνεπάγεται και με αυξημένη παροχή υπηρεσιών και δεύτερον και σημαντικότερον, επιβεβαίωσαν

ότι η βελτιστοποίηση με τη χρήση του ακέραιου προγραμματισμού αποτελεί βιώσιμη επιλογή για τον προσδιορισμό των βέλτιστων διαδρομών διέλευσης.

Από εκείνη περίπου τη χρονική στιγμή και μετά ξεκίνησαν οι μελετητές να συμπεριλαμβάνουν ως παράμετρο και την μόλυνση του περιβάλλοντος κατά το σχεδιασμό δικτύων αστικής συγκοινωνίας. Με άλλα λόγια, προσπάθησαν να ενσωματώσουν όρους βιωσιμότητας στην ανάπτυξη μοντέλων σχεδιασμού δικτύων μεταφοράς. Για παράδειγμα, ορισμένες μελέτες εισήγαγαν, ως στόχο σχεδιασμού κατά την ανάπτυξη μοντέλων σχεδιασμού δικτύου, την ελαχιστοποίηση αποτυπώματος άνθρακα [Cirriani et al. (2006), Gallo et al. (2011)].

Επομένως, καθώς αυξάνονταν οι ανησυχίες για την ποιότητα του περιβάλλοντος αλλά και για την κοινωνική δικαιοσύνη και την οικονομική αποδοτικότητα, έγιναν προσπάθειες για τη βελτίωση της βιωσιμότητας των δημόσιων μεταφορών σε όλο τον κόσμο. Η μελέτη των **Myeonghyeon, Seung-Young, Dong-Kyu (2019)** στοχεύει να προτείνει ένα πρόβλημα σχεδιασμού δικτύου διαδρομών διέλευσης το οποίο θα λαμβάνει υπόψη τις ιδιομορφίες και την χωρική ισότητα – δικαιοσύνη. Αυτά καθορίζονται χρησιμοποιώντας δύο δείκτες οι οποίοι μπορούν να αντικατοπτρίσουν ταυτόχρονα την κινητικότητα και την προσβασιμότητα.

Την ίδια χρονιά, οι **Iliopoulou & Kepaptsoglou (2019)** μελέτησαν την τεχνολογία ασύρματης μεταφοράς ενέργειας (Wireless Power Transfer – WPT) στα ηλεκτροκίνητα οχήματα αστικής συγκοινωνίας. Η τεχνολογία αυτή, προσφέρει δυνατότητες βελτίωσης του αποτυπώματος άνθρακα που προκαλούν τα λεωφορεία, προσφέροντας παράλληλα ποιοτικές υπηρεσίες. Συγκεκριμένα το άρθρο τους, ερευνά το συνδυασμό του προβλήματος σχεδιασμού δικτύου μεταφοράς (TRNDP) με το πρόβλημα χωροθέτησης υποδομής φόρτισης (CILP) και προτείνουν ένα μοντέλο δύο επιπέδων για τη διαχείριση και των δύο σταδίων σχεδιασμού. Το άρθρο αυτό, αποτέλεσε και το πρώτο στη βιβλιογραφία το οποίο ασχολήθηκε με το πρόβλημα σχεδιασμού δικτύου λαμβάνοντας αποκλειστικά ηλεκτρικούς στόλους λεωφορείων, γεγονός που περιπλέκει τη διαδικασία σχεδιασμού. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η διαδικασία σχεδιασμού πρέπει, παράλληλα με τη δημιουργία των διαδρομών, να εξετάζει τον τύπο και τη θέση των υποδομών φόρτισης γύρω από το δίκτυο λεωφορείων. Με άλλα λόγια, στο άρθρο αυτό παρουσιάστηκε μια μεθοδολογία για την διαχείριση του προβλήματος του σχεδιασμού δικτύων ηλεκτροκίνητων οχημάτων, αντιμετωπίζοντας τη διαδικασία λήψης απόφασης ως συνδυασμό δύο αλληλένδετων υπό – προβλημάτων.

Από όσα άρθρα έχουν αναφερθεί έως αυτό το σημείο, κανένα δεν χρησιμοποιεί την μέθοδο της επιλογής στα μαθηματικά μοντέλα που παρουσιάζουν, εκτός από δύο που αναλύονται στη συνέχεια.

Το άρθρο των **Fusco et al. (2013)** ασχολείται με το πρόβλημα του σχεδιασμού συστημάτων μεταφοράς για έναν μικτό στόλο, ηλεκτρικών και εσωτερικής καύσης λεωφορείων, και εισάγει ένα μοντέλο για την επιλογή τύπου

οχήματος που περιλαμβάνει τον υπολογισμό του εσωτερικού και εξωτερικού κόστους διάρκειας ζωής. Σε αντίθεση με προηγούμενες εργασίες που επικεντρώθηκαν σε πρόβλημα σχεδιασμού δικτύου μεταφοράς, αυτό το μοντέλο θεωρεί το σύνολο των διαδρομών συγκεκριμένο και σταθερό. Εισάγει, αντί για διαφορετικές εναλλακτικές λύσεις γρήγορης φόρτισης, περιορισμούς που σχετίζονται με την αυτονομία της μπαταρίας, την κατανάλωση ενέργειας και τη μεταφορά ισχύος από το ηλεκτρικό δίκτυο. Εφαρμογή του μοντέλου πραγματοποιήθηκε σε ένα τμήμα του δικτύου της Ρώμης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα σενάρια με ηλεκτρικά οχήματα έχουν υψηλότερο κόστος επένδυσης και προσωπικού. Ωστόσο, αντισταθμίζονται από το χαμηλότερο περιβαλλοντικό και ενεργειακό κόστος, εάν οι φορτιστές σε στάσεις λεωφορείων έχουν αρκετά υψηλή ισχύ για να περιορίσουν τόσο τον αριθμό των εξοπλισμένων στάσεων λεωφορείων όσο και το χρόνο φόρτισης. Τέλος, υποστηρίζουν ότι λόγω της τεράστιας κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων απαιτείται ο σχεδιασμός ενός συστήματος που θα εστιάζει στην ενέργεια και την οικονομική βιωσιμότητα. Επιπλέον, η βαριά ατμοσφαιρική ρύπανση των αστικών περιοχών χρειάζεται, εκτός από πολιτικές προσανατολισμένες στη ζήτηση, μια αναδιοργάνωση των συστημάτων μεταφοράς και μεγαλύτερη χρήση οχημάτων χαμηλών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, όπως ηλεκτρικά, υβριδικά και οχήματα συμπιεσμένου φυσικού αερίου (Compressed Natural Gas – CNG).

Οι **Zhang et. al (2017)** σε άρθρο τους, εκτός του ότι αναλύουν πρώτα τη διαδικασία λειτουργίας του ηλεκτρικού λεωφορείου και στη συνέχεια υιοθετούν μια μέθοδο προσομοίωσης, τη λεγόμενη Monte Carlo, για την προσομοίωση της λειτουργίας των οχημάτων αυτών, διαμορφώνουν ένα μοντέλο βέλτιστης επιλογής ηλεκτροδότησης λεωφορειακών γραμμών και καθιερώνουν μια σχηματική ακολουθία των διαδρομών για τη λήψη αποφάσεων εξηλεκτρισμού. Τέλος, πραγματοποιούν μια μελέτη για να δοκιμαστεί η απόδοση του προτεινόμενου μοντέλου. Η προτεινόμενη εργασία θα επιτρέψει στην εταιρεία δικτύου να ποσοτικοποιήσει το όφελος από τον εξηλεκτρισμό των δημόσιων συγκοινωνιών και το αντίκτυπο που θα έχει η φόρτιση των ηλεκτρικών λεωφορείων στο παρόν δίκτυο, βοηθώντας τους να αναλύσουν ποια διαδρομή είναι κατάλληλη για πρώτη φορά να ηλεκτροδοτηθεί και εάν η δομή του δικτύου πρέπει να αναβαθμιστεί όταν και αν κριθεί απαραίτητο. Το άρθρο αυτό δίνει μεγάλη έμφαση στα ζητήματα που παρουσιάζουν τα ηλεκτρικά λεωφορεία κατά τη λειτουργία φόρτισης. Υποστηρίζουν ότι η ηλεκτροδότηση των λεωφορείων της πόλης θα μπορούσε να αποφέρει διάφορα οφέλη, όπως έσοδα από την πώληση ενέργειας, μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, βελτίωση των συνθηκών λειτουργίας του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, χρήση κεφαλαίων κ.α. Ο στόχος του μοντέλου είναι να μεγιστοποιήσει το καθαρό όφελος το οποίο προκύπτει από το όφελος μείωσης των εκπομπών CO₂ και το επενδυτικό κόστος ενίσχυσης του δικτύου. Οι μεταβλητές απόφασης για την εταιρεία δικτύου είναι να σχεδιάσει ένα σύστημα

ηλεκτροδότησης (τύπος ηλεκτρικού λεωφορείου και ισχύ φόρτισης) και να επιλέγεται ποια διαδρομή λεωφορείου είναι κατάλληλη να ηλεκτροδοτηθεί με σκοπό να ικανοποιηθεί το απαιτούμενο επίπεδο εξηλεκτρισμού. Τα αποτελέσματα έδειξαν, ότι ένα κατάλληλο επίπεδο ηλεκτροδότησης δρομολογίων λεωφορείων σε μια πόλη είναι επωφελές. Η μελέτη αποτελεί μια εργαλειοθήκη τόσο για την ανάλυση αποτελεσματικότητας ηλεκτροδότησης λεωφορείων της πόλης όσο και για τον προγραμματισμό δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

Τέλος, υπάρχει ένα πολύ πρόσφατο άρθρο το οποίο πλησιάζει τη λογική της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έχει όμως διαφορετικό στόχο. Συγκεκριμένα, το άρθρο των **Díez & Restrepo (2021)**, παρουσιάζει μια μέθοδο σχεδιασμού ηλεκτρικής υποδομής για συστήματα μεταφοράς που λειτουργούν με οχήματα που συνδέονται εν μέρει στο δίκτυο και έχουν ενσωματωμένες μπαταρίες. Αρχικά, έγινε μια σύντομη περιγραφή των καινοτόμων ηλεκτρικών συστημάτων μεταφοράς που συνδυάζουν τη συνδεδεμένη στο δίκτυο λειτουργία με τη λειτουργία με μπαταρία. Στη συνέχεια, δόθηκαν τα πλεονεκτήματα του συνδυασμού σύνδεσης στο δίκτυο και παροχής ενέργειας από την μπαταρία σε συστήματα Bus Rapid Transit (BRT) και τέλος, έγινε η δοκιμή της μεθόδου σχεδιασμού σε μια διαδρομή BRT στο Μεντεγίν της Κολομβίας, χρησιμοποιώντας υπολογιστικές προσομοιώσεις σε συνδυασμό με πραγματικά λειτουργικά δεδομένα από ηλεκτρικά λεωφορεία. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους και προσεγγίσεις για τον σχεδιασμό της υποδομής των Battery Electric Bus (BEB), η προτεινόμενη τεχνική εστίασε στο σύστημα και όχι μόνο στα οχήματα. Ο στόχος της τεχνικής αυτής, από την πλευρά του οχήματος, ήταν να βοηθήσει τον σχεδιαστή να επιλέξει το σωστό μέγεθος των μπαταριών και της χωρητικότητας του οχήματος, ενώ από την πλευρά του συστήματος ο στόχος ήταν η χωροθέτηση και διαστασιολόγηση των τμημάτων διαδρομής που θα ηλεκτροδοτηθούν. Επομένως, ο σκοπός αυτού του άρθρου ήταν να παρουσιάσει μια βέλτιστη τεχνική σχεδιασμού συστήματος IMC για την επιλογή του καλύτερου συνδυασμού μεγέθους μπαταρίας, ηλεκτροδοτούμενων τμημάτων και υποδομής φόρτισης στους τερματικούς που εγγυάται την ορθή λειτουργία ενός συστήματος BRT υψηλής ζήτησης.

2.3 Τρόλεϊ με Συσσωρευτές (Battery Assisted Trolleybus – BAT)

2.3.1 Όχημα

Ένα τρόλεϊ με μπαταρία είναι ένα όχημα που χρησιμοποιεί ηλεκτρικό κινητήρα. Η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται κυρίως, από τα εναέρια καλώδια επαφής τα οποία είναι τοποθετημένα πάνω από τη λωρίδα κίνησης του οχήματος. Ωστόσο, σε σύγκριση με το συμβατικό τρόλεϊ, έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να διέρχεται από τμήματα διαδρομής τα οποία δεν διαθέτουν τέτοια εναέρια καλώδια. Αυτό, μπορεί να επιτευχθεί προσθέτοντας μια επιπλέον πηγή ενέργειας. Υπάρχουν δύο πιθανές προσεγγίσεις για αυτή την πρόσθετη πηγή ενέργειας. Η μία είναι η προσθήκη ενός κινητήρα ντίζελ, ο οποίος θα χρησιμεύει ως γεννήτρια ηλεκτρικής ενέργειας για τον κύριο κινητήρα έλξης και θα ενεργοποιείται μόνο κατά τη διάρκεια τμημάτων διαδρομής τα οποία δεν θα διαθέτουν εναέρια καλώδια. Όμως, ο πιο ενδιαφέρον και πιο φιλικός, προς το περιβάλλον, τρόπος είναι να προστεθεί μια μπαταρία, η οποία θα μπορεί να φορτίζει κατά τη διέλευση από τα τμήματα με ηλεκτροφόρα εναέρια καλώδια.

Αυτά τα νέας τεχνολογίας τρόλεϊ, τα οποία είναι φιλικά προς το περιβάλλον, έχουν πολλά πλεονεκτήματα να προσφέρουν, τόσο οικονομικά όσο και στο επιβατικό κοινό. Αρχικά, οι μπαταρίες εκείνες, που θα χρησιμοποιούνται στο όχημα μπορεί να είναι μικρής, σχετικά, χωρητικότητας και να χρησιμεύουν μόνο ως βοηθητική πηγή ενέργειας. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της προσέγγισης αυτής, είναι η παραγωγή λιγότερων επικίνδυνων για το περιβάλλον αποβλήτων όταν η μπαταρία θα αντικαθίσταται. Η μπαταρία έλξης, μπορεί μεν να διαθέτει σημαντικά χαμηλότερη χωρητικότητα από εκείνες στα συμβατικά ηλεκτρικά λεωφορεία, αλλά μπορεί να παρέχει αρκετή ισχύ για να καλύψει σχετικά μεγάλη απόσταση χωρίς την ανάγκη επαφής στα εναέρια καλώδια. Κύριο πλεονέκτημα, επίσης, αποτελεί το γεγονός ότι τα οχήματα δεν χρειάζεται ποτέ να σταματήσουν για να φορτίσουν τις μπαταρίες τους. Ακόμα, αξίζει να αναφερθεί ότι η απόδοσή τους είναι ακριβώς η ίδια, είτε κινούνται κάτω από τα εναέρια καλώδια είτε απλά, κάνοντας χρήση, μόνο της μπαταρίας τους. Με τα οχήματα αυτά, υπάρχει επίσης η δυνατότητα, εξοικονόμησης σημαντικής ποσότητας ενέργειας. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα δημοσιευμένης έρευνας δείχνουν ότι μπορεί να εξοικονομηθεί έως και 20% της ενέργειας, σε σύγκριση με την περίπτωση των συμβατικών τρόλεϊ [Ritter et al. (2016)]. Στο Σχήμα 4 φαίνεται η μορφή του τρόλεϊ με μπαταρία (BAT).



Σχήμα 4: Το νέας τεχνολογίας τρόλεϊ με μπαταρία (BAT) [trolley:motion, E-Bus-Systems]

2.3.2 Μπαταρία

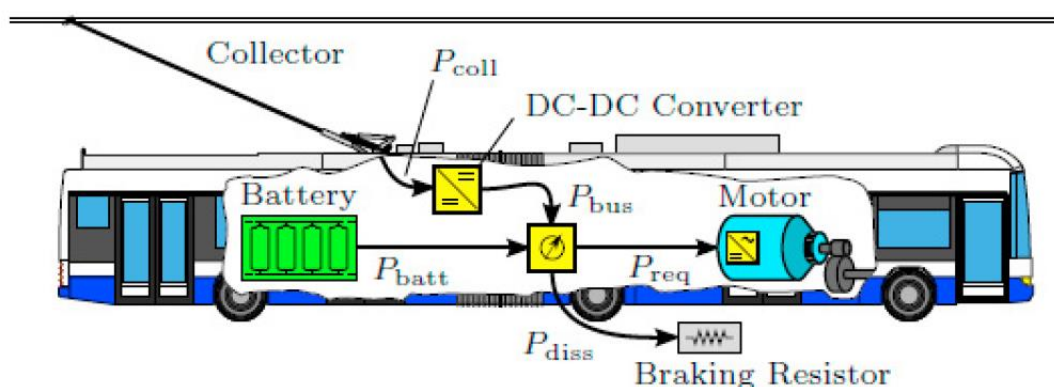
Οι μπαταρίες έλξης, θεωρούνται πως είναι, το πιο σημαντικό μέρος του υπό μελέτη οχήματος. Το πλεονέκτημα είναι ότι αυτή, η νέα τεχνολογία, απαιτεί από δύο έως δέκα φορές μικρότερες, σε χωρητικότητα μπαταρίες σε σύγκριση με αυτές των ηλεκτρικών λεωφορείων που κινούνται πλήρως με αυτές. Επιπλέον, σε περίπτωση αδυναμίας πρόσβασης στη διαδρομή ή τυχαίας διακοπής του ηλεκτρικού ρεύματος στα εναέρια καλώδια, το όχημα μπορεί εύκολα να συνεχίσει την πορεία του. Στο Σχήμα 5 φαίνονται τα βασικά εξαρτήματα του τρόλεϊ με μπαταρία.

Η πιο σημαντική παράμετρος της μπαταρίας είναι η χωρητικότητα. Η χωρητικότητα της μπαταρίας που τοποθετείται στο όχημα, μεταβάλλεται. Μέχρι σήμερα, η επιλογή στη χωρητικότητα της μπαταρίας κυμαίνεται μεταξύ 60kWh και 90kWh [Dobrosław Grygara (2019)]. Εάν επιλεγεί μπαταρία μεγαλύτερης χωρητικότητας, το βάρος του οχήματος αυξάνεται και κατά επέκταση, μειώνεται η χωρητικότητα του οχήματος σε επιβάτες. Κατά συνέπεια, θα αυξηθεί και η έκταση του οχήματος. Επομένως, όσο πιο μεγάλη η μπαταρία που θα εγκατασταθεί, τόσο πιο μεγάλο και το κόστος απόκτησης του οχήματος, και το αντίστροφο.

Η αυτονομία του τρόλεϊ με μπαταρία που χρησιμοποιεί μόνο τις μπαταρίες έλξης κυμαίνεται από 10 έως 30 km, ανάλογα με τη χωρητικότητα της μπαταρίας, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, το προφίλ διαδρομής, το φορτίο του οχήματος και πολλούς άλλους παράγοντες [Rice (2017)], [Bartłomiejczyk (2017)], [Bartłomiejczyk et al. (2013)].

Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας έλξης είναι περιορισμένη. Οι χρησιμοποιημένες μπαταρίες θεωρούνται πιθανά επικίνδυνα απόβλητα για το περιβάλλον, παρά το γεγονός ότι η τεχνολογία εξελίσσεται. Βέβαια, πολλές είναι οι εταιρείες εκείνες, που ισχυρίζονται ότι συγκεκριμένες μπαταρίες είναι πλήρως ανακυκλώσιμες.

Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας είναι ευαίσθητη, για αυτό χρειάζεται προσοχή στην επιλογή της σωστής στρατηγικής φόρτισης. Στο άρθρο των [Rogge et al. (2015)] προτείνεται η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (State Of Charge – SOC) να κυμαίνεται μεταξύ 20% και 90%. Αυτό επεκτείνει σημαντικά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Η διαδικασία φόρτισης της μπαταρίας δεν είναι γραμμική. Ωστόσο, το προαναφερθέν επίπεδο λειτουργίας μπορεί να προσεγγιστεί με μια γραμμική συνάρτηση εάν η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (SOC) οριστεί να είναι μικρότερη από 80% χωρητικότητα χωρίς σημαντικό σφάλμα σύμφωνα με το άρθρο των [Montoya et al. (2017)]. Προκειμένου να διατηρηθεί η βέλτιστη διάρκεια ζωής μιας μπαταρίας έλξης και να εξοικονομηθεί ηλεκτρική ενέργεια, συνιστάται να ακολουθούνται αυτά τα όρια. Έτσι, το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας του οχήματος πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 20% και 80% της πραγματικής χωρητικότητας της μπαταρίας.



Σχήμα 5: Απεικόνιση των βασικών εξαρτημάτων του τρόλεϊ με μπαταρία [Ritter et al. (2016)]

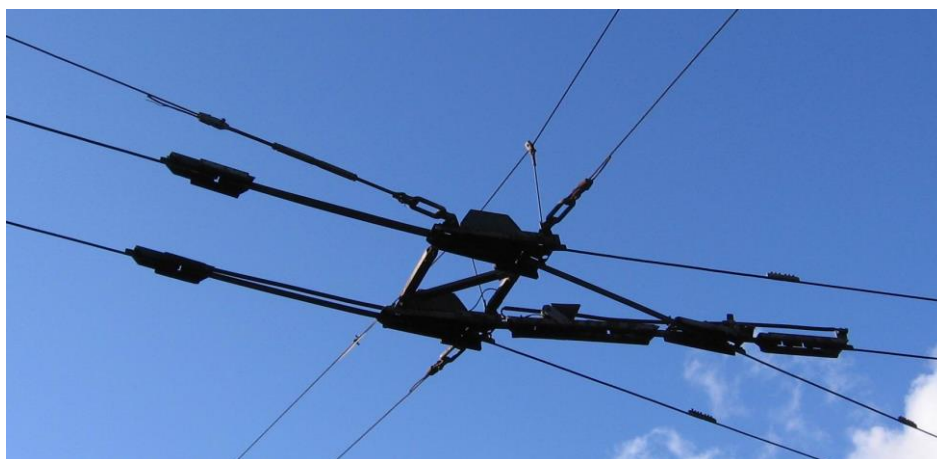
Τέλος, η μπαταρία έλξης που διαθέτει το νέας τεχνολογίας τρόλεϊ, χρησιμοποιείται για πλήρη ηλεκτρική λειτουργία, συμπεριλαμβανομένων συσκευών άνεσης όπως ηλεκτρική θέρμανση. Η σύνδεση και αποσύνδεση του συστήματος συλλογής ενέργειας λειτουργεί αξιόπιστα σε όλο τον κόσμο, σε όλες τις καιρικές συνθήκες και γίνεται με πολύ απλό τρόπο.

2.3.3 Εναέρια Καλώδια

Τα εναέρια καλώδια επαφής και η συντήρησή τους αποτελούν σημαντικό μέρος του κόστους ολόκληρου του συστήματος μεταφοράς. Επομένως, γίνεται προσπάθεια ελαχιστοποίησης του μήκους αυτών. Επιπλέον, πέρα του κόστους, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που επιτάσσουν το μήκος των καλωδίων να είναι το ελάχιστο. Ένας από αυτούς είναι η αισθητική επίδραση των εναέριων καλωδίων επαφής, ειδικά στην περίπτωση των ιστορικών κέντρων. Χρησιμοποιώντας τρόλεϊ με μπαταρία είναι δυνατό να σχεδιαστούν διαδρομές με τέτοιο τρόπο ώστε να μην απαιτούνται πυλώνες σε ακατάλληλα μέρη, όπως για παράδειγμα στα ιστορικά κέντρα ή σε μεγάλες κεντρικές διασταυρώσεις. Ο συνολικός αριθμός των πυλώνων μπορεί να μειωθεί λόγω των μπαταριών που θα διαθέτει το τρόλεϊ.

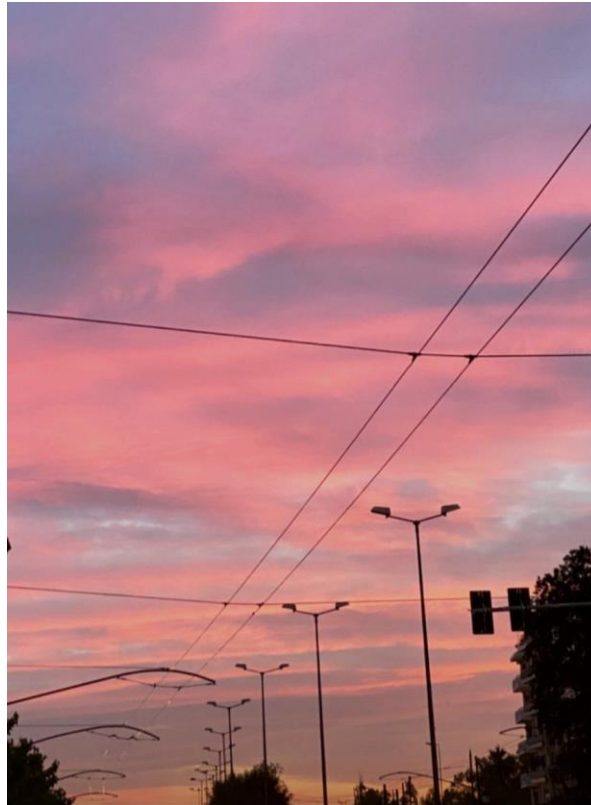
Σύμφωνα με τις διαθέσιμες παρατηρήσεις της λειτουργίας τέτοιων οχημάτων στην επιλεγμένη διαδρομή στην πόλη Γκντύνια της Πολωνίας, μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι η κατασκευή των εναέριων καλωδίων επαφής είναι απαραίτητη για περίπου το 50% της διαδρομής [Dobrosław Grygara (2019)]. Αυτό το ποσοστό μπορεί επίσης να είναι μικρότερο υπό ορισμένες συνθήκες [Bartłomiejczyk (2017)].

Όσον αφορά τη σύνδεση και την αποσύνδεση του τρόλεϊ με τα εναέρια καλώδια επαφής, θα πρέπει να αναφερθεί ότι δεν επηρεάζει τη χρονική διάρκεια του ταξιδιού, επειδή η διαδικασία αυτή είναι αυτοματοποιημένη και πραγματοποιείται απευθείας στις προσαρμοσμένες στάσεις λεωφορείων κατά την επιβίβαση ή την αποβίβαση των επιβατών. Στο Σχήμα 6 φαίνονται τα εναέρια καλώδια τρόλεϊ τα οποία τέμνονται σε κάποια διασταύρωση.



Σχήμα 6: Τομή εναέριων καλωδίων τρόλεϊ [Wikiwand]

Τέλος, συγκρίνοντας την τεχνολογία των τρόλεϊ με μπαταρία με την επαγωγική φόρτιση των ηλεκτρικών λεωφορείων παρατηρείται ότι το πρώτο υπερέχει στο εξής: η κατασκευή εναέριων καλωδίων επαφής δεν απαιτεί σκάψιμο και η συντήρηση είναι επίσης απλούστερη από ότι στην επαγωγική προσέγγιση. Στο Σχήμα 7 που ακολουθεί φαίνονται τα εναέρια καλώδια των συμβατικών τρόλεϊ στην Αθήνα.



Σχήμα 7: Τα εναέρια καλώδια τρόλεϊ στην Αθήνα

2.3.4 Πόλοι

Συνήθως, τα τρόλεϊ είναι εξοπλισμένα με δύο πόλους – κεραίες, οι οποίοι τοποθετούνται παράλληλα στην κορυφή του τρόλεϊ, στο πίσω μέρος. Ο σκοπός αυτών, είναι να αντλούν ρεύμα από τα δύο εναέρια καλώδια της γραμμής επαφής. Οι πόλοι είναι δύο, διότι τοποθετείται ένας πόλος ανά καλώδιο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8.



Σχήμα 8: Οι πόλοι του τρόλεϊ με μπαταρία [TROLLEY project - UITP]

Τα συστήματα πόλων είναι αυτόματης ανύψωσης και συνδέονται στα εναέρια καλώδια επαφής, ακόμη και αν η εναέρια γραμμή επαφής δεν βρίσκεται ακριβώς πάνω από το όχημα.

2.3.5 Σύγκριση με Ηλεκτρικά Λεωφορεία

Γενικά, τα ηλεκτρικά λεωφορεία μπορούν να βοηθήσουν στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, της ρύπανσης και του θορύβου. Μία, όμως, εναλλακτική και καλύτερη ιδέα ηλεκτρικού λεωφορείου είναι εκείνο που θα φορτίζει εν κινήσει και όχι καθ' όλη της διάρκειας της διαδρομής του, όπως το υπό μελέτη όχημα, δηλαδή το τρόλεϊ με μπαταρία. Ως συνδυασμός ενός απλού τρόλεϊ και ενός ηλεκτρικού λεωφορείου με μπαταρία, το νέο αυτό τρόλεϊ μπορεί να λειτουργήσει ακόμα και με αποκλειστική χρήση της μπαταρίας του. Έτσι, το μήκος των εναέριων καλωδίων που απαιτούνται μπορεί να μειωθεί σημαντικά. Σε σύγκριση με άλλα ηλεκτρικά λεωφορεία, το τρόλεϊ που διαθέτει μπαταρία είναι το οικονομικότερο σύστημα λεωφορείων για γραμμές υψηλής χωρητικότητας [Bergk et al. (2016)]. Το μεγάλο πλεονέκτημα των νέων τρόλεϊ έναντι των ηλεκτρικών λεωφορείων είναι το γεγονός ότι μπορούν να λειτουργούν ασταμάτητα, χωρίς να παρουσιάζεται, δηλαδή, η ανάγκη να σταματήσουν για να φορτίσουν. Έτσι, μειώνεται και ο απαιτούμενος αριθμός στόλου οχημάτων.

2.3.6 Σύγκριση με Συμβατικά Τρόλεϊ

Το συμβατικό τρόλεϊ είναι ένα ηλεκτρικό λεωφορείο το οποίο φορτίζει δυναμικά. Η δυναμική φόρτιση παρέχεται μέσω της άμεσης επαφής των πόλων (κεραιών) του τρόλεϊ με την εναέρια γραμμή επαφής (εναέρια καλώδια). Γενικά, η άμεση επαφή είναι η πιο αποτελεσματική μέθοδος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το ένα ηλεκτρικό κύκλωμα στο άλλο. Ένα συμβατικό τρόλεϊ μπορεί να εκτελεί δρομολόγια για όσο απαιτείται λειτουργικά, ενώ αυτόνομα μπορεί να ταξιδέψει μικρές μόνο αποστάσεις, έως περίπου 10 χιλιόμετρα, χωρίς επαφή με τα εναέρια καλώδια, βασιζόμενο αποκλειστικά στην ηλεκτρική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στις ενσωματωμένες μπαταρίες του. Καθώς η χωρητικότητα και η απόδοση των συστημάτων φόρτισης, αποθήκευσης και διαχείρισης ενέργειας βελτιώνονται και καθώς η ενεργειακή απαίτηση των υποσυστημάτων μειώνεται μέσω βελτιώσεων που προκύπτουν, αυξάνεται και η αυτονομία των τρόλεϊ. Έτσι αναπτύχθηκε η νέα τεχνολογία τρόλεϊ, δηλαδή τα τρόλεϊ με μπαταρία (BAT). Όπως έχει προαναφερθεί, το νέο αυτό τρόλεϊ, σε σύγκριση με το συμβατικό, έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να διέρχεται από μεγάλα τμήματα διαδρομής τα οποία δεν διαθέτουν εναέρια καλώδια, χρησιμοποιώντας μόνο την μπαταρία τους. Όσον αφορά το κόστος των τρόλεϊ με μπαταρία, αναμένεται να είναι μεγαλύτερο από αυτό των συμβατικών τρόλεϊ, αλλά το λειτουργικό τους κόστος, συμπεριλαμβανομένης της συντήρησης, θα είναι χαμηλότερο από αυτό των συμβατικών βάσει των πληροφοριών που παρέχονται στο [Rice et al. (2017)].

2.3.7 Σύγκριση με Τραμ

Τραμ ονομάζεται ο ελαφρύς σιδηρόδρομος της πόλης, ο οποίος είναι μικρός, ηλεκτροκίνητος, διαθέτει τη δική του ξεχωριστή λωρίδα και κυκλοφορεί στους εντός πόλης δρόμους. Τα ηλεκτροκίνητα τραμ κινούνται επάνω σε σιδηροδρομικές γραμμές επί του δρόμου και συλλέγουν την ενέργεια που χρειάζονται για να κινηθούν από εναέρια γραμμές που βρίσκονται σε όλο το μήκος της διαδρομής τους, μέσω του παντογράφου.

Συγκρίνοντας το τραμ με τα τρόλεϊ που διαθέτουν μπαταρία, παρατηρείται ότι τα δεύτερα πλεονεκτούν. Συγκεκριμένα, το κόστος σχεδιασμού και κατασκευής της υποδομής για το τραμ είναι πολύ μεγαλύτερο από εκείνο του νέου τρόλεϊ. Μάλιστα, αν στο σύστημα υποδομής του νέου τρόλεϊ χρησιμοποιηθεί η προϋπάρχουσα υποδομή, δηλαδή τα εναέρια καλώδια που ήδη υπάρχουν και εξυπηρετούν τα συμβατικά τρόλεϊ, τότε το κόστος μειώνεται αισθητά.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα που έχουν τα νέας τεχνολογίας τρόλεϊ έναντι των τραμ είναι το γεγονός ότι, λόγω, του ότι κινούνται στο δρόμο και όχι σε σιδηροδρομικές γραμμές, αναπτύσσουν μεγαλύτερο συντελεστή τριβής και μπορούν έτσι να εκτελέσουν με ευκολία δρομολόγια με μεγάλες κλίσεις.

Τέλος, το δίκτυο των τρόλεϊ μπορεί πολύ εύκολα να τροποποιηθεί ή μελλοντικά και να επεκταθεί σε σύγκριση με αυτό του τραμ που απαιτεί επιπλέον μελέτη, σχεδιασμό και κατασκευή.

2.4 Δυναμική Φόρτιση – Φόρτιση Εν Κινήσει (IMC)

2.4.1 Γενικά

Η αστική εξάπλωση και η σημαντική περιβαλλοντική υποβάθμιση είναι δύο από τους κυριότερους παράγοντες που οδήγησαν σε ένα νέο ενδιαφέρον για την αστική ανάπτυξη και τη βιώσιμη αστική κινητικότητα. Οι τελευταίες τεχνολογίες ανταποκρίθηκαν στο δημόσιο κάλεσμα για καλύτερες περιβαλλοντικές και απαλλαγμένες από ορυκτά καύσιμα εναλλακτικές λύσεις. Η μετάβαση στην ηλεκτρική ενέργεια είναι σχετικά ακριβή, αλλά χρησιμοποιώντας συστήματα υψηλής απόδοσης, όπως ελαφρύ ή βαρύ σιδηρόδρομο, η ηλεκτροκίνηση μπορεί να είναι οικονομικά αποδοτική, βιώσιμη και, τελικά, μια μόνιμη λύση χωρίς προβλήματα.

Οι ηλεκτρικές λύσεις μεταφοράς βασίζονται στη μόνιμη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στο κινούμενο όχημα, κάτι που επιτυγχάνεται με το σύστημα φόρτισης εν κινήσει, το λεγόμενο στη βιβλιογραφία In Motion Charging (IMC). Η ανάπτυξη των ηλεκτρικών μπαταριών οδήγησε τους μηχανικούς να προτείνουν νέες, φιλικές προς το περιβάλλον λύσεις και να κάνουν τα ηλεκτρικά οχήματα πιο ευέλικτα.

Το σύστημα IMC αποτελεί μια εναλλακτική λύση φόρτισης και βοηθά στη μείωση των επενδυτικών κινδύνων ηλεκτροδότησης των μεταφορών, κυρίως μειώνοντας τις αβεβαιότητες σχετικά με τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και το ενδεχόμενο κόστος αντικατάστασης [Bartłomiejczyk (2019)].

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, όπως:

- **Η στιγμιαία φόρτιση (Flash Charging)**, δηλαδή φόρτιση στις στάσεις λεωφορείου για περίπου 10 - 15 δευτερόλεπτα κατά την επιβίβαση και αποβίβαση των επιβατών,

- **Η ευκαιριακή φόρτιση (Opportunity Charging)**, δηλαδή φόρτιση στους τερματικούς σταθμούς μεταξύ των αλλαγών βάρδιας,
- **Η φόρτιση κατά τη διάρκεια της νύχτας (Overnight Charging)**, δηλαδή φόρτιση κατά τη διάρκεια της νύχτας στα αμαξοστάσια/τερματικούς σταθμούς ή
- **Η φόρτιση εν κινήσει (In Motion Charging - IMC).**

Το σύστημα IMC παρέχει μια πολύ αποτελεσματική και ενδιαφέρουσα λύση για την ηλεκτροδότηση των αστικών συγκοινωνιών, καθώς όλα τα άλλα συστήματα φόρτισης εμφανίζουν να έχουν όρια. Αυτό διότι, η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας διαρκεί περίπου εκατό φορές περισσότερο από τη μεταφορά χημικής ενέργειας, παρέχοντας δηλαδή πετρέλαιο ντίζελ στο λεωφορείο. Το σύστημα In Motion Charging μπορεί επίσης να συνδυαστεί και με την ευκαιριακή φόρτιση.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας της μπαταρίας επέτρεψε στο τρόλεϊ να γίνει μια βιώσιμη λύση στη στρατηγική των πόλεων να στραφούν στην ηλεκτρική ενέργεια. Κατά την κίνηση, το τρόλεϊ φορτίζει τις ενσωματωμένες μπαταρίες του, οι οποίες του επιτρέπουν κατά μέσο όρο, για κάθε χιλιόμετρο κάτω από τη γραμμή εναέριων καλωδίων να κάνει ένα, δύο ή ακόμα και τρία χιλιόμετρα χωρίς αυτά, σε μέσες συνθήκες κίνησης. Το εύρος που θα εκτελέσει αυτόνομα, εξαρτάται από την κατανάλωση ενέργειας κατά τη λειτουργία του (μήκος οχήματος, κλίσεις κ.λπ.) αλλά και τα όρια ισχύος του εξοπλισμού [UITP].

Στο σύστημα IMC ένα τμήμα της διαδρομής του λεωφορείου συνοδεύεται από εναέρια καλώδια τα οποία χρησιμοποιούνται για τη φόρτιση των μπαταριών. Τα οχήματα καλύπτουν το υπόλοιπο τμήμα της διαδρομής, δηλαδή το τμήμα όπου δεν υπάρχει γραμμή επαφής, κάνοντας χρήση της μπαταρίας τους. Αυτό επιτρέπει τη φόρτιση του οχήματος χωρίς την ανάγκη αποκλεισμού του από την κυκλοφορία, αυξάνοντας έτσι την ευελιξία και τη λειτουργικότητα του συστήματος συγκοινωνίας. Επιπλέον, καλύπτοντας ένα τμήμα μιας διαδρομής με επαφή στα εναέρια καλώδια, μειώνεται η απαιτούμενη απόσταση που πρέπει να γίνει, αποκλειστικά, κάνοντας χρήση της ενέργειας από την μπαταρία. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί στη μείωση της χωρητικότητας των απαιτούμενων μπαταριών, γεγονός πολύ σημαντικό.

Η κατασκευή εναέριων γραμμών καλωδίων συνδέεται με σημαντικές χρηματοοικονομικές δαπάνες, επομένως, από οικονομική άποψη, συνιστάται να περιοριστεί το μήκος ενός τέτοιου τμήματος, όπως έχει προαναφερθεί. Από την άλλη πλευρά, το τμήμα που θα περιέχει τα εναέρια καλώδια θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να επιτρέπει τη φόρτιση των μπαταριών. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο ο καθορισμός των απαιτήσεων για ελάχιστο μήκος τμημάτων εναέριων καλωδίων είναι ένα σημαντικό ζήτημα που λαμβάνεται υπόψη όταν σχεδιάζονται τα συστήματα ηλεκτρικών λεωφορείων IMC.

Με το σύστημα IMC η φόρτιση γίνεται στον δρόμο, κατά την κίνηση, και όχι σε σταθμούς φόρτισης. Αυτό, δεν απαιτεί επενδύσεις σε νέα υποδομή φόρτισης, εάν υπάρχει ήδη υποδομή τρόλεϊ, η οποία αξιοποιείται από τα νέας τεχνολογίας και επίσης, δεν χρειάζεται επιπλέον χρόνος για τη φόρτιση μπαταριών κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Στην περίπτωση όμως, που θα πρέπει να εγκατασταθούν νέα εναέρια καλώδια, είναι προτιμότερο να εγκαθίσταται στα λιγότερο ακριβά μέρη (π.χ. σε ευθείες γραμμές) ή σε πιο σημαντικά σημεία (π.χ. σε στάσεις με μεγάλους σχετικά χρόνους αναμονής ή σε κλίσεις με υψηλότερη ζήτηση ενέργειας). Το πιο σημαντικό είναι ο χρόνος που θα βρίσκεται το τρόλεϊ κάτω από τα εναέρια καλώδια.

Γενικά, όταν το όχημα κινείται με χαμηλή ταχύτητα κάτω από τα καλώδια, αυξάνει το ποσοστό φόρτισης, σε σύγκριση με αυτόν όταν θα πήγαινε με μεγαλύτερη ταχύτητα. Επομένως, είναι πιο οικονομικό να εγκατασταθεί το σύστημα In Motion Charging σε τμήματα διαδρομών στα οποία κινούνται τα οχήματα με χαμηλότερες ταχύτητες από ότι σε αυτοκινητόδρομους υψηλότερης ταχύτητας.

Ιδανικά, πολλές διαδρομές που εξυπηρετούνται από ηλεκτρικά λεωφορεία μπορούν να συνδυαστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να διέρχονται όλα, από ένα μόνο, κοινό τμήμα συστήματος IMC. Αυτό, θα βελτίωνε τη συνεργασία πολλών δρομολογίων που μοιράζονταν την ίδια υποδομή και θα είχε ως αποτέλεσμα μια ακόμη πιο οικονομική επένδυση.

Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι το μήκος των τμημάτων που συνοδεύονται από τα εναέρια καλώδια επαφής πρέπει να είναι επαρκές για τη φόρτιση των μπαταριών έλξης με ενέργεια, τουλάχιστον ίση με την ενέργεια που απαιτείται για την κάλυψη του τμήματος χωρίς καλώδια. Ως εκ τούτου, αναμένεται ότι ο χρόνος φόρτισης της μπαταρίας θα ελαχιστοποιηθεί, πράγμα που σημαίνει ότι η ισχύς φόρτισης, δηλαδή η ταχύτητα φόρτισης πρέπει να μεγιστοποιηθεί.

2.4.2 Πλεονεκτήματα και Δυσκολίες

Το μεγάλο πλεονέκτημα της νέας αυτής τεχνολογίας φόρτισης είναι το γεγονός ότι είναι αναγκαίο να καλυφθεί μόνο το 20% με 40 % της συνολικής διαδρομής από τα εναέρια καλώδια επαφής. Άλλα πλεονεκτήματα είναι τα εξής:

- Έως και 80% της συνολικής διαδρομής εκτελείται αυτόνομα, δηλαδή με τη χρήση των μπαταριών που διαθέτει το όχημα.
- Δεν χρειάζεται το όχημα να σταματήσει για να φορτίσει.
- Προσφέρει απόδοση και ευελιξία.

- Δεν απαιτούνται επιπλέον οχήματα και οδηγοί χρησιμοποιώντας το σύστημα IMC, λόγω του ότι δεν υπάρχει η ανάγκη να διακοπεί η κίνηση του οχήματος.
- Μεγαλύτερη εξυπηρέτηση της ζήτησης επειδή μικρότερη χωρητικότητα μπαταρίας σημαίνει και μειωμένος ο όγκος της άρα, περισσότεροι επιβάτες εντός του οχήματος.
- Η υποδομή δεν είναι μόνο φθηνότερη ανά χιλιόμετρο, αλλά και μικρότερη κατά 60 με 80%.
- Η επένδυση σε υποδομές για το σύγχρονο τρόλεϊ είναι λιγότερο δαπανηρή από ότι στην περίπτωση του συμβατικού τρόλεϊ και πολύ λιγότερο σε σύγκριση με αυτήν του τραμ.
- Η υποδομή των εναέριων καλωδίων είναι απλούστερη και φθηνότερη από αυτήν, ενός συμβατικού τρόλεϊ καθώς, μπορούν να αποφευχθούν ακριβοί μετατροπείς, καλώδια σε διασταυρώσεις, ακόμα και σε κάποιες καμπύλες στροφές.
- Η ισορροπημένη ενεργειακή ζήτηση των οχημάτων με μπαταρίες οδηγεί σε μεγαλύτερη χρήση και αξιοποίηση της υποδομής.

Όσον αφορά τις δυσκολίες, τα ηλεκτρικά λεωφορεία είναι ένα σχετικά νέο μέσο μεταφοράς, επομένως δεν υπάρχει αρκετή εμπειρία όσον αφορά στη λειτουργία τους. Η αγορά των ηλεκτρικών οχημάτων αναπτύσσεται δυναμικά και είναι αρκετά δύσκολο να προσδιοριστούν οι τάσεις αλλαγής της τιμής αγοράς ηλεκτρικών οχημάτων στο μέλλον. Επιπλέον, υπάρχει έλλειψη εμπειρίας σχετικά με τη λειτουργία μπαταριών έλξης μεγάλης χωρητικότητας. Ο βασικός παράγοντας εδώ, είναι η διάρκεια ζωής της μπαταρίας, η οποία μέχρι σήμερα είναι δύσκολο να εκτιμηθεί. Όλα αυτά δημιουργούν υψηλό ρίσκο στην ένταξη του συγκεκριμένου μέσου στο σύστημα μεταφοράς. Συγκεκριμένα, αναμφίβολα παραμένουν τα εξής:

- η τιμή αγοράς νέων οχημάτων,
- το κόστος αντικατάστασης της μπαταρίας,
- η κυκλοφοριακή συμφόρηση και η επίδρασή της στη διαδικασία φόρτισης.

Πρέπει να αναφερθεί ότι οι τεχνολογίες μπαταριών θα συνεχίσουν να αναπτύσσονται, γεγονός που θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ισχύος φόρτισης. Επομένως, τα χαρακτηριστικά των μπαταριών δεν παίζουν πλέον περιοριστικό ρόλο στα συστήματα IMC.

2.4.3 Επιτυχημένα Παραδείγματα Εφαρμογής του IMC σε Διάφορες Πόλεις

Τα τελευταία 130 χρόνια, τα συμβατικά τρόλεϊ λειτουργούν σε περίπου 300 πόλεις σε όλο τον κόσμο. Η ταχεία ανάπτυξη τεχνολογιών μπαταριών (π.χ. Li-ion, LFP και LTO) αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα στην δημιουργία τάσης εισαγωγής λεωφορείων μπαταρίας σε αστικά περιβάλλοντα. Επίσης, οδήγησε τα τρόλεϊ να γίνουν και πάλι ενδιαφέροντα στην αγορά, ανοίγοντας το δρόμο για τη βιώσιμη κινητικότητα. Τα τρόλεϊ που είναι εξοπλισμένα με μπαταρία προσφέρουν πολλά νέα πλεονεκτήματα.

Τα τελευταία χρόνια, αρκετές είναι οι πόλεις εκείνες που έχουν εισάγει οχήματα που χρησιμοποιούν το σύστημα φόρτισης IMC. Αυτές είναι οι εξής: Έμπερσβαλντ, Έσλιγκεν, Σόλινγκεν, Φρίμπουργκ, Κάλιαρι, Ζυρίχη, Γενεύη, Βέρνη, Μπίελ, Γκντύνια, Λούμπλιν, Άρνεμ, Στζέγκεντ, Τούλα, Νάλτσικ, Αγία Πετρούπολη, Ροσάριο, Μαρακές, Ντίετον, Σιάτλ, Σαν Φρανσίσκο και άλλα.

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες από τις πόλεις στις οποίες έχει εφαρμοστεί με επιτυχία το σύστημα φόρτισης IMC – φόρτισης εν κινήσει, καθώς και κάποιες ανερχόμενες εφαρμογές αυτού:

1. Πράγα (Πόλη της Τσεχίας)

Η ηλεκτροδότηση των δημόσιων μεταφορών αποτελεί ουσιαστικό μέρος της στρατηγικής της Πράγας για τη μείωση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων των μεταφορών. Το όραμα της Πράγας για το σύστημα In Motion Charging είναι ουσιαστικά ένας συνδυασμός: In Motion Charging, ευκαιριακής φόρτισης και ολονύκτιας φόρτισης στον τερματικό σταθμό.



Σχήμα 9: Το τρόλεϊ με μπαταρία στην Πράγα [Sustainable Bus]

Το επόμενο βήμα για την ανάπτυξη του συστήματος IMC στην Πράγα είναι η προετοιμασία για την πλήρη ηλεκτροδότηση της γραμμής 140. Η γραμμή έχει μήκος 23km, ο χρονικός διαχωρισμός είναι 6 – 7 λεπτά και θα εξυπηρετείται από 15 οχήματα τρόλεϊ.

2. Αγία Πετρούπολη (Πόλη της Ρωσίας)

Η Αγία Πετρούπολη ολοκλήρωσε το πρώτο στάδιο της δημιουργίας του πρώτου μεγάλου ολοκληρωμένου έργου στη Ρωσία (μετά από πρωτοποριακές διαδρομές στην Τούλα και το Νάλτσικ) για σύγχρονα τρόλεϊ χρησιμοποιώντας το σύστημα φόρτισης In Motion Charging. Ο νέος αυτός τρόπος μεταφοράς σχεδιάζεται να ξεκινήσει από το ιστορικό κέντρο της πόλης.



Σχήμα 10: Το τρόλεϊ με μπαταρία στην Αγία Πετρούπολη [Urban Transport Magazine]

Είναι η πρώτη πόλη της Ρωσίας που εφαρμόζει μια συστηματική προσέγγιση για τη μετάβαση σε ένα σύστημα In Motion Charging, αγοράζοντας 115 καινοτόμα τρόλεϊ τα έτη 2017 – 2018. Αυτό, αποτέλεσε και το μεγαλύτερο συμβόλαιο για τέτοια οχήματα στη χώρα.

Έξι μήνες τακτικών λειτουργιών των νέων τρόλεϊ ήταν αρκετοί για να καταστεί δυνατή η χρήση όλων των πλεονεκτημάτων της νέας αυτής τεχνολογίας, συγκεκριμένα:

- Έγινε επέκταση των γραμμών τρόλεϊ σε νέες κατοικημένες περιοχές χωρίς την ανάγκη κατασκευής νέων υποδομών.
- Κατέστη δυνατή η άμεση αλλαγή δρομολογίων τρόλεϊ τα οποία τύχαινε να διέρχονται από περιοχές στις οποίες γινόντουσαν έργα οδοποιίας.

- Διπλασιάστηκε το μήκος διαδρομής του τρόλεϊ κατά την μεγάλη περίοδο που επισκευαζόταν το τραμ.
- Αφαιρέθηκαν τα εναέρια καλώδια που βρισκότουσαν μπροστά από μνημεία στο ιστορικό κέντρο και χαλούσαν την αισθητική της πόλης.

3. Γκντύνια (Πόλη της Πολωνίας)

Από το 2009, η Γκντύνια ξεκίνησε τη λειτουργία τρόλεϊ με το σύστημα In Motion Charging. Αρχικά, τα οχήματα ήταν εξοπλισμένα με μπαταρίες νικελίου-καδμίου χωρητικότητας 16 kWh. Από το 2015, έχουν τεθεί σε λειτουργία οχήματα που διαθέτουν υψηλής χωρητικότητας μπαταρίες ιόντων λιθίου με χωρητικότητα συγκεκριμένα 40 kWh και 69 kWh.

Λόγω των πολύ καλών χαρακτηριστικών που διαθέτουν τα τρόλεϊ, η δυνατότητα αυτόνομης κίνησής τους χρησιμοποιείται, όχι μόνο σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, αλλά και όταν είναι ανεπαρκής ο αριθμός των δρομολογίων των λεωφορείων. Στην περίπτωση αυτή, τα τρόλεϊ που διαθέτουν μπαταρία λειτουργούν συχνά σε διαδρομές λεωφορείων χρησιμοποιώντας, για σκοπούς φόρτισης, την εναέρια γραμμή καλωδίων που καλύπτει τα κοινά τμήματα των διαδρομών.



Σχήμα 11: Το τρόλεϊ με μπαταρία στην Γκντύνια [trolley:motion, E-Bus-Systems]

Αυτό έγινε σε μεγάλη κλίμακα από τις 29 Ιουνίου έως την 1η Ιουλίου του 2016, σε συνεργασία με τη διοργάνωση του Open'er Festival. Χρησιμοποιώντας τη βοηθητική τους κίνηση, τα τρόλεϊ μπόρεσαν να καλύψουν μεγάλα τμήματα των διαδρομών, φτάνοντας τα 29km.

Αυτό το έργο επέτρεψε να δημιουργηθεί μια βάση δεδομένων η οποία περιέχει μετρήσεις σχετικά με τη λειτουργία των τρόλεϊ τα οποία χρησιμοποιούν αρκετά την βοηθητική πηγή ενέργειας που διαθέτουν για την κίνησή τους, δηλαδή τις μπαταρίες τους. Επίσης, αυτά τα δεδομένα που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκαν ως κατευθυντήριες γραμμές στη διαστασιολόγηση των διαδρομών δημόσιας συγκοινωνίας, οι οποίες βασίζονται στο σύστημα In Motion Charging. Αυτή η εργασία πραγματοποιήθηκε, στο πλαίσιο του έργου “H2020 Electrification of public transport in cities”.

4. Έσλιγκεν & Σόλινγκεν (Πόλεις της Γερμανίας)

Στο Σόλινγκεν, τα ντιζελοκίνητα λεωφορεία της γραμμής 695 μετατράπηκαν σε ηλεκτρικά IMC 500. Σε αυτή τη γραμμή λειτουργούσαν τα ντιζελοκίνητα λεωφορεία αλλά και ένα αμφίδρομο τμήμα μήκους 2km εναέριων καλωδίων.



Σχήμα 12: Το τρόλεϊ με μπαταρία στο Σόλινγκεν [Sustainable Bus]

Τα εναέρια αυτά καλώδια ήταν αρκετά, για τη φόρτιση των λεωφορείων IMC 500 ώστε να καλύψουν μια κυκλική διαδρομή 18 χιλιομέτρων, φτάνοντας σχεδόν το 80% να το καλύπτουν χρησιμοποιώντας μόνο τις μπαταρίες τους. Αυτό είναι εφικτό λόγω ενός πολύ ισχυρού εξοπλισμού που επιτρέπει την τροφοδοσία ισχύος 500kW, εξού και το όνομα, από το εναέριο καλώδιο, προμηθεύοντας τους κινητήρες έλξης (2 κινητήρες ισχύος 160kW ο καθένας), τα βοηθητικά συστήματα όπως θέρμανση ή κλιματισμό με 40kW και ταυτόχρονα η μπαταρία επαναφορτίζεται με έως και 240kW. Χάρη σε αυτή την ισχυρή τεχνολογία φόρτισης IMC500, η απαιτούμενη

ποσότητα καλωδίων εναέριας κυκλοφορίας είναι ελάχιστη, ανοίγοντας την προοπτική για πολλές άλλες υπάρχουσες γραμμές λεωφορείων να μετατραπούν σε γραμμές που θα λειτουργούν με το σύστημα In Motion Charging και δεν θα επιβαρύνουν το περιβάλλον με εκπομπές βλαβερών αερίων. Ο στόχος του λεωφορείου IMC500 για το Έσλιγκεν ήταν η επέκταση της γραμμής που θα κινείται αυτόνομα κατά τα δύο τρίτα της διαδρομής, άρα να είναι μόνο το ένα τρίτο αυτής κάτω από τα εναέρια καλώδια.

5. Φρίμπουργκ (Ελβετία)

Στο Φρίμπουργκ της Ελβετίας, από τις αρχές του 2021, ξεκίνησαν να κυκλοφορούν 10 νέα τρόλεϊ με μπαταρία, τα οποία αντικατέστησαν τα συμβατικά τρόλεϊ που λειτουργούσαν 16 χρόνια. Με αυτή την αντικατάσταση εκτιμήθηκε ότι θα εξοικονομηθούν περίπου 300.000 με 400.000 λίτρα ντίζελ ετησίως, σύμφωνα με τους υπολογισμούς της εταιρείας της δημόσιας συγκοινωνίας. Η τιμή αγοράς των νέων αυτών οχημάτων μπορεί να είναι σχετικά αυξημένη αλλά είναι πολύ πιο φιλικά προς το περιβάλλον και δεν προκαλούν ηχορύπανση. Αξίζει να αναφερθεί ότι το όχημα αυτό, διαθέτει μία μπαταρία χωρητικότητας 66 kWh και υπολογίστηκε ότι έχει ανάγκη επαφής με τα εναέρια καλώδια μόνο στο 28% της διαδρομής του, ενώ το υπόλοιπο τμήμα εκτελείται με τη χρήση αποκλειστικά της μπαταρίας που διαθέτει.



Σχήμα 13: Το τρόλεϊ με μπαταρία στο Φρίμπουργκ [Sustainable Bus]

6. Ανερχόμενες Εφαρμογές του συστήματος IMC

Πολλές πόλεις που διαθέτουν υποδομή τρόλεϊ, έχουν ήδη θέσει σε λειτουργία νέα οχήματα τρόλεϊ που λειτουργούν με το σύστημα φόρτισης εν κινήσει (In Motion Charging), όπως το Μοντρέ και η Γενεύη.



Σχήμα 14: Το τρόλεϊ με μπαταρία στη Γενεύη [TPG Bus Trolley VanHool EquiCity]

Επιπλέον, στην Ιταλία εγκαταστάθηκαν το 2019 νέες εναέριες γραμμές για τις ταχείες παράκτιες μεταφορές (Rapid Coastal Transport), μεταξύ Ρίμινι και Ριτσιόνε, για τη λειτουργία ηλεκτρικού λεωφορείου Rapid Transit (BRT) καθώς και ένα νέο σύστημα στη Βερόνα.

2.4.4 Σύγκριση με την Ευκαιριακή Φόρτιση

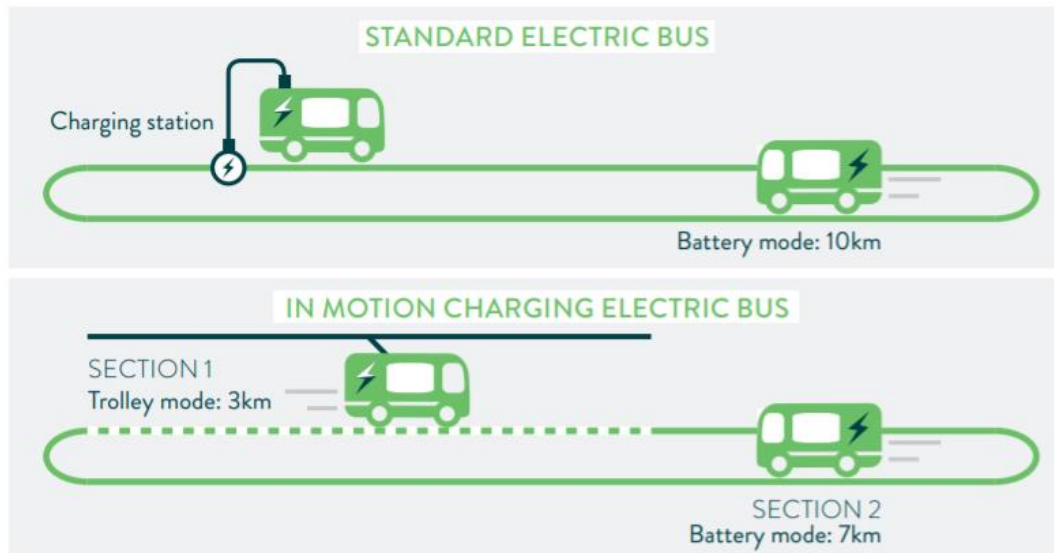
Η στατική φόρτιση συνεπάγεται με την ανάγκη διακοπής του οχήματος για να φορτίσει, γεγονός που σημαίνει ότι ο η εταιρία διαχείρισης και λειτουργίας της αστικής συγκοινωνίας χάνει χρόνο, άρα και χρήματα κατά την αναγκαστική αυτή διακοπή λειτουργίας. Επιπλέον, αυτό μπορεί να οδηγήσει στην ανάγκη αύξησης του αριθμού των οχημάτων που απαιτούνται για τη λειτουργία της γραμμής. Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει ένα παράδειγμα τεσσάρων διαφορετικών χρόνων φόρτισης για διαφορετικά μεγέθη οχήματος κατά τη λειτουργία μιας διαδρομής 15km στην οποία οι σταθμοί φόρτισης εντοπίζονται και στους δύο τερματικούς σταθμούς.

Πίνακας 1: Χρόνοι Φόρτισης ανά Μήκος Οχήματος [PKT Gdynia]

Μήκος Οχήματος (m)	Χρόνος Φόρτισης (min)
12	9
15	10
18	12
24	16
Κατανάλωση Ενέργειας: 2.2 – 2.6 – 3.2 – 4 kWh	

Η ανάγκη διακοπής του οχήματος για να φορτίσει δημιουργεί προβλήματα ακόμα και σε περίπτωση κυκλοφοριακής συμφόρησης. Προκαλεί καθυστέρηση στην ώρα άφιξης στην τελική στάση, γεγονός που μειώνει τον χρόνο που απομένει για την επαναφόρτιση του οχήματος. Σε περίπτωση στατικής φόρτισης επαφής, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε καταστάσεις όπου ο υπολειπόμενος χρόνος στάσης είναι πολύ μικρός για τη φόρτιση του οχήματος και μπορεί να προκαλέσει την ανάγκη χρήσης δεύτερου εφεδρικού οχήματος.

Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζεται σχηματικά, η σύγκριση της ευκαιριακής με την εν κινήσει φόρτιση:



▶ Covering part of the route by overhead wires allow to reduce the capacity of the batteries

Σχήμα 15: Συγκριτική σχηματική απεικόνιση της ευκαιριακής και της εν κινήσει φόρτισης [PKT Gdynia]

Επίσης, επισημαίνεται ότι ο τρόπος φόρτισης (στατικός ή δυναμικός, δηλαδή In Motion Charging) έχει θεμελιώδη επίδραση στον κύκλο της μπαταρίας. Σε περίπτωση στατικής φόρτισης, είναι απαραίτητο να φορτιστεί η μπαταρία με τόση ενέργεια όση απαιτείται για να καλυφθεί ολόκληρη η απόσταση της διαδρομής. Η δυναμική φόρτιση επιτρέπει την συσσώρευση μικρότερης ποσότητας ενέργειας, επειδή το μήκος του τμήματος που θα πρέπει να κινηθεί αυτόνομα είναι μικρότερο.

2.5 Σύνοψη

Συνοψίζοντας, στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκαν, αρχικά, τα σημαντικότερα άρθρα της βιβλιογραφίας για το πρόβλημα του Σχεδιασμού Δικτύων Διαδρομών Αστικής Συγκοινωνίας από το 1985 μέχρι σήμερα καθώς και, άρθρα που χρησιμοποιούν τη μέθοδο της επιλογής στον σχεδιασμό. Στη συνέχεια, δόθηκαν πληροφορίες για τα τρόλεϊ με μπαταρία (BATs) που εξετάζει η παρούσα διπλωματική εργασία. Συγκεκριμένα, αναλύθηκαν τα χαρακτηριστικά του οχήματος, οι μπαταρίες που ενσωματώνονται σε αυτό, οι πόλοι τους και τα εναέρια καλώδια που χρησιμοποιούν κατά τη φόρτισή τους. Γίνεται επίσης, σύγκριση των BAT με άλλα ηλεκτρικά οχήματα όπως ηλεκτρικά λεωφορεία και τραμ αλλά και με τα συμβατικά τρόλεϊ. Τέλος, δίνονται πληροφορίες και για το σύστημα φόρτισης που χρησιμοποιούν τα BAT, το σύστημα, δηλαδή, φόρτισης εν κινήσει (IMC). Αναλυτικότερα, δίνονται τα πλεονεκτήματα και οι δυσκολίες αυτού, συγκρίνεται με τα άλλα συστήματα φόρτισης και παρουσιάζονται ορισμένες επιτυχημένες εφαρμογές του ανά τον κόσμο.

Αξίζει να αναφερθεί ότι το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας δηλαδή, η διαμόρφωση μαθηματικού μοντέλου το οποίο θα επιλέγει τις βέλτιστες λεωφορειακές γραμμές ενός δικτύου, να αντικατασταθούν τα ντιζελοκίνητα οχήματα που τις λειτουργούν, με τα νέα τρόλεϊ με μπαταρίες, αποτελεί ένα αντικείμενο που δεν έχει, έως σήμερα, μελετηθεί από άλλους ερευνητές. Επομένως, λόγω του ότι, επιπλέον, γίνεται προσπάθεια ένταξης της ηλεκτροκίνησης στις αστικές συγκοινωνίες και μάλιστα το γεγονός ότι το BAT αποτελεί ένα καινοτόμο, λειτουργικά αποδοτικό και φιλικό προς το περιβάλλον ηλεκτρικό όχημα, η παρούσα μελέτη παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

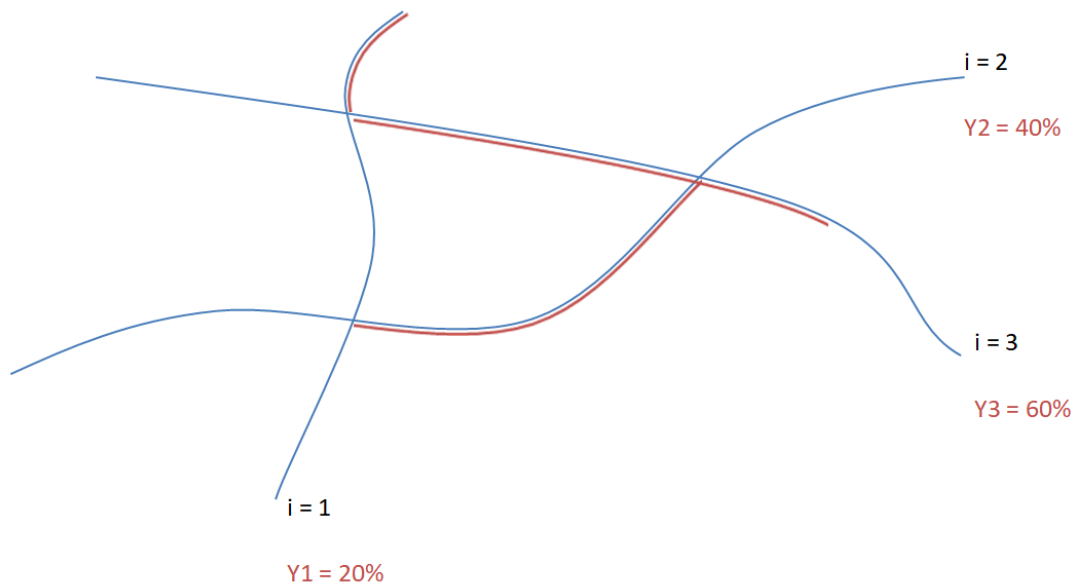
3.1 Γενικά Στοιχεία



Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο που διαμορφώθηκε, με σκοπό την επίλυση του υπό εξέταση προβλήματος. Στόχος είναι να αναπτυχθεί ένα μοντέλο, το οποίο θα επιλέγει τις λεωφορειακές γραμμές, εκείνες, που συμφέρει, από περιβαλλοντική και οικονομική άποψη, να αντικατασταθούν τα ντιζελοκίνητα λεωφορεία που τις λειτουργούν από τα νέα τρόλεϊ με μπαταρία. Αυτά, τα φιλικά προς το περιβάλλον οχήματα, θα εκτελούν τη διαδρομή των ντιζελοκίνητων λεωφορείων με την ίδια συχνότητα και θα αντλούν ρεύμα από τα τμήματα του δρόμου που τυχαίνει να συμπίπτουν με τις υπάρχουσες εναέριες γραμμές συμβατικών τρόλεϊ. Τα τρόλεϊ που κάνουν χρήση της μπαταρίας του, επιτρέπουν την αντικατάσταση των ντιζελ λεωφορείων έχοντας ανάγκη να περάσουν μόνο από ένα μικρό κομμάτι κάτω από εναέρια καλώδια.

3.2 Λογική Διαμόρφωσης Μαθηματικού Μοντέλου

Η επίλυση του προβλήματος προσεγγίζεται με τη μέθοδο του γραμμικού, ακέραιου προγραμματισμού, καθώς πρόκειται για πρόβλημα βελτιστοποίησης. Προκειμένου να επιλεγούν οι βέλτιστες διαδρομές που θα αντικατασταθούν από νέα τρόλεϊ με μπαταρία ορίζονται η αντικειμενική συνάρτηση και κάποιοι περιορισμοί. Αναζητείται η λύση εκείνη, η οποία θα μεγιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση και θα ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς. Οι στόχοι του μαθηματικού μοντέλου είναι η μεγιστοποίηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που εξοικονομούνται και η ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης για τα οχήματα νέας τεχνολογίας. Οι περιορισμοί χρησιμεύουν στο να περιορισθεί το εύρος των εναλλακτικών λύσεων αλλά και να ικανοποιούνται ορισμένες απαιτήσεις, αποδίδοντας έτσι τη βέλτιστη λύση.

Η λογική με την οποία διαμορφώθηκε το μαθηματικό μοντέλο φαίνεται στο Σχήμα 16 που ακολουθεί:



ΥΠΟΜΝΗΜΑ	
	Γραμμή λεωφορείου diesel ($i \rightarrow$ αριθμός γραμμής)
	Εναέρια καλώδια τρόλεϊ ($Y_i \rightarrow$ Ποσοστό κάλυψης)
Ερώτημα: Επιλέγεται η γραμμή i να αντικατασταθεί από το νέο τρόλεϊ ή όχι;	

Σχήμα 16: Η λογική διαμόρφωσης του μαθηματικού μοντέλου

3.3 Δεδομένα και Συμβολισμοί

Αρχικά, ως δεδομένα για το πρόβλημα είναι το δίκτυο των i υφιστάμενων λεωφορειακών γραμμών και το δίκτυο τρόλεϊ. Έπειτα από μία προεργασία των δεδομένων αυτών, η οποία θα περιγραφεί στο επόμενο υποκεφάλαιο, προκύπτουν οι γραμμές εκείνες που επικαλύπτονται από τμήματα του δικτύου τρόλεϊ και κατά επέκταση το ποσοστό κάλυψης των γραμμών από εναέρια καλώδια (Y_i). Το σύνολο I περιλαμβάνει τις i πιθανές λεωφορειακές γραμμές, μήκους l_i , για την αντικατάστασή τους από τα νέα τρόλεϊ, $I = \{i: 1, 2, \dots, I\}$. Δεδομένα, επίσης, αποτελούν η συχνότητα διέλευσης των diesel λεωφορείων η οποία θα ταυτίζεται με τη συχνότητα διέλευσης νέων τρόλεϊ σε κάθε γραμμή (f_i^{BAT}), καθώς και η συχνότητα διέλευσης συμβατικών τρόλεϊ σε κάθε γραμμή (f_i^{TR}).

Γνωστά είναι ακόμα, η συνολική ισχύς φόρτισης που παρέχουν τα καλώδια (p_i) και η ισχύς που αντλούν τα συμβατικά τρόλεϊ ανά χιλιόμετρο (PD). Με τα δύο αυτά στοιχεία και με γνώση των συχνοτήτων διέλευσης προκύπτει η ισχύς που απομένει για τα BAT (p_i^{BAT}) με μαθηματικό τύπο που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια. Εύκολα, επίσης, υπολογίζεται και ο χρόνος (t_i) που βρίσκεται το νέο

τρόλει κάτω από καλώδια σε κάθε γραμμή καθώς, και ο χρόνος κύκλου διαδρομής (t_i^{cycle}). Η διαίρεση του χρόνου κύκλου με την χρονοαπόσταση των BAT σε κάθε γραμμή (**hw**) δίνει τον αριθμό των νέων οχημάτων που θα χρειαστούν, με άλλα λόγια τον αριθμό των ντιζελοκίνητων λεωφορείων που θα αντικατασταθούν ανά γραμμή.

Τέλος, το κόστος αγοράς των νέων οχημάτων BAT συμβολίζεται με C_{inv} ενώ, το περιβαλλοντικό κόστος σε € για τη μόλυνση από τις εκπομπές CO₂ στην ατμόσφαιρα από τα diesel λεωφορεία με C_{em} . Γνωστά επίσης, είναι η μέση ταχύτητα των BAT (V_m^{BAT}), η μέση κατανάλωση ενέργειάς τους ανά χιλιόμετρο ($EC_{average}^{BAT}$), η χωρητικότητα της μπαταρίας τους (**BC**), το μέγιστο επιτρεπόμενο επίπεδο φόρτισης αυτής (**SoC_{max}**), καθώς και οι ρύποι που εκπέμπονται από τα diesel λεωφορεία ανά χιλιόμετρο (**emi**).

Παρακάτω στον Πίνακας 2, φαίνονται όλες οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στο μαθηματικό μοντέλο που ακολουθεί:

Πίνακας 2: Συμβολισμός και Περιγραφή Παραμέτρων Μαθηματικού Μοντέλου

Συμβολισμός	Περιγραφή
a	Βάρος για την πρώτη παράμετρο της αντικειμενικής συνάρτησης $a \in [0,1]$
b	Βάρος για την δεύτερη παράμετρο της αντικειμενικής συνάρτησης $b \in [0,1]$
i	Γραμμές ντιζελοκίνητων λεωφορείων
I	Το σύνολο των γραμμών ντιζελοκίνητων λεωφορείων, $I = \{i: 1, 2, \dots, I\}$
l_i	Το μήκος κάθε γραμμής <i>i</i> (km)
Y_i	Κάλυψη της κάθε γραμμής <i>i</i> από καλώδια τρόλεϊ (%)
p_i	Ισχύς φόρτισης από τα καλώδια σε κάθε γραμμή (kW)
PD	Ισχύς που αντλούν τα συμβατικά τρόλεϊ (kW/km)
p_i^{BAT}	Ισχύς που απομένει για τα BAT σε κάθε γραμμή (kW)
f_i^{BAT}	Συχνότητα διέλευσης BAT σε κάθε γραμμή \equiv με τη συχνότητα διέλευσης των ντιζελοκίνητων λεωφορείων (οχήματα/h)
f_i^{tr}	Συχνότητα διέλευσης συμβατικών τρόλεϊ σε κάθε γραμμή (οχήματα/h)
t_i	Ο χρόνος που βρίσκεται το BAT κάτω από καλώδια σε κάθε γραμμή (h)

t_i^{cycle}	Ο χρόνος κύκλου του BAT σε κάθε γραμμή (h)
hw	Η μέση χρονοαπόσταση μεταξύ των BAT σε κάθε γραμμή (h)
C_{inv}	Κόστος αγοράς ενός BAT (€)
C_{em}	Το περιβαλλοντικό κόστος σε € για τη μόλυνση από τις εκπομπές CO ₂ στην ατμόσφαιρα από τα ντιζελοκίνητα λεωφορεία (€/kg)
V_m^{BAT}	Μέση ταχύτητα BAT (km/h)
$EC_{\text{average}}^{\text{BAT}}$	Μέση κατανάλωση ενέργειας των BAT (kWh/km)
BC	Η χωρητικότητα της μπαταρίας του οχήματος BAT (kWh)
SoC_{max}	Το μέγιστο επιτρεπόμενο επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας (%)
emi	Οι ρύποι που εκπέμπονται από τα ντιζελοκίνητα λεωφορεία (kg/km)
Y_{min}	Το ελάχιστο αποδεκτό ποσοστό κάλυψης (%)
P_{max}	Η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή χρησιμοποιούμενης ισχύς ανά γραμμή (kW)
P_{totalmax}	Η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή χρησιμοποιούμενης ισχύς συνολικά (kW)

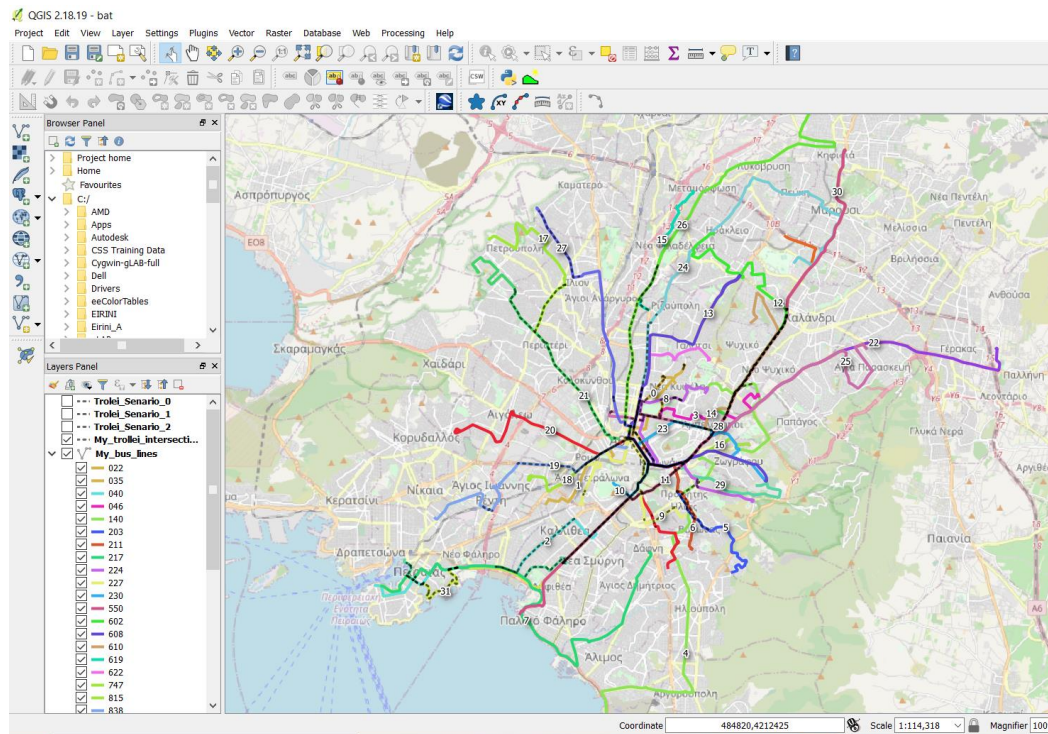
3.4 Προ - επεξεργασία Δεδομένων

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, πριν την διαμόρφωση του μαθηματικού μοντέλου, γίνεται μια προ - επεξεργασία (Pre-processing) των δεδομένων. Συγκεκριμένα, έχοντας ως δεδομένα τα δύο δίκτυα, ντιζελοκίνητων λεωφορείων και συμβατικών τρόλεϊ, γίνεται μια διαδικασία στο περιβάλλον επεξεργασίας χωρικών δεδομένων "QGIS", ώστε να προκύψουν τα μήκη των γραμμών, των τμημάτων καλωδίων αλλά και το ποσοστό κάλυψης.

Αρχικά, γίνεται τομή των δύο δικτύων και προκύπτουν τα τμήματα τρόλεϊ που διέρχονται από λεωφορειακές γραμμές. Στη συνέχεια, αναζητούνται οι λεωφορειακές γραμμές εκείνες που επικαλύπτονται, έστω και σε ένα πολύ μικρό τμήμα, από τα τμήματα τρόλεϊ που εξήχθησαν προηγουμένως.

Έπειτα, εμφανίζοντας στις περιγραφικές πληροφορίες, τα μήκη των λεωφορειακών γραμμών και των τμημάτων καλωδίων σε κάθε μία, γίνεται ο υπολογισμός του ποσοστού κάλυψης κάθε γραμμής από εναέρια καλώδια τρόλεϊ.

Παρακάτω, στο Σχήμα 17, παρουσιάζεται η τυπική μορφή του λογισμικού GIS, στο οποίο έγινε η προ – επεξεργασία των δεδομένων:



Σχήμα 17: Τυπική Μορφή Λογισμικού “GIS”

3.5 Μεταβλητή Απόφασης

Η μεταβλητή απόφασης για το παρόν πρόβλημα είναι μία και συμβολίζεται με X_i . Η μεταβλητή αυτή, είναι δυαδική και παίρνει την τιμή 1 αν η γραμμή i επιλέγεται να αντικατασταθεί με ΒΑΤ αντί για ντιζελοκίνητο λεωφορείο, ενώ αν δεν επιλέγεται παίρνει την τιμή 0. Παρακάτω παρουσιάζεται και σε πίνακα:

Πίνακας 3: Συμβολισμός και Περιγραφή Μεταβλητής Απόφασης Μαθηματικού Μοντέλου

Συμβολισμός	Περιγραφή
X_i	=1 αν επιλέγεται η γραμμή i να διέρχεται ΒΑΤ αντί για ντιζελοκίνητο λεωφορείο, αλλιώς 0

3.6 Μαθηματικό Μοντέλο

3.6.1 Αντικειμενική Συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται ως η διαφορά του περιβαλλοντικού κόστους από το κόστος επένδυσης για τα νέα οχήματα τρόλεϊ. Στόχος είναι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης να μεγιστοποιηθεί. Το περιβαλλοντικό κόστος ορίζεται ως το οικονομικό κόστος των εκπομπών αερίων του διοξειδίου του άνθρακα που απελευθερώνονται από τα υπάρχοντα ντιζελοκίνητα λεωφορεία στα οχηματοχιλιόμετρα που διανύουν ανά γραμμή, ενώ, το κόστος επένδυσης ορίζεται με το κόστος αγοράς του αριθμού των τρόλεϊ με μπαταρία που θα χρειαστούν. Παρακάτω φαίνεται ο μαθηματικός τύπος της αντικειμενικής συνάρτησης:

$$\max \left(a \cdot \sum_i (X_i \cdot l_i \cdot f_i^{BAT} \cdot emi \cdot C_{em}) - b \cdot \sum_i \left(X_i \cdot \left(\frac{t_i^{cycle}}{hw} \right) \cdot C_{inv} \right) \right)$$

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι παράμετροι a και b λαμβάνουν τιμές μεταξύ του μηδενός και της μονάδας και πρόκειται για βάρη που αντιστοιχούν στο περιβαλλοντικό και στο επενδυτικό κόστος, αντίστοιχα. Τα βάρη αυτά θα χρησιμεύσουν κατά την εφαρμογή του μοντέλου για να δοθεί έμφαση σε έναν από τους δύο στόχους ή και στους δύο όμοια. Συγκεκριμένα, όταν $a = 1$ και ταυτόχρονα $b = 1$, βαρύτητα δίνεται και στους δύο στόχους αντίστοιχα. Όταν όμως, για παράδειγμα, $a = 0.90$ και $b = 0.10$, αποκτά μεγαλύτερη σημασία η μεγιστοποίηση των εκπομπών CO₂ που εξοικονομούνται και λιγότερο η ελαχιστοποίηση του επενδυτικού κόστους. Έτσι, οι τιμές των βαρών που θα εφαρμοστούν κάθε φορά λαμβάνονται ανάλογα με το ποιο κριτήριο θεωρείται πιο σημαντικό.

Λόγω του ότι οι τιμές που προκύπτουν από το πρώτο τμήμα της αντικειμενικής συνάρτησης είναι διαφορετικής τάξης μεγέθους από αυτές του δεύτερου, καθίσταται αναγκαίο να γίνει μια κανονικοποίηση των τιμών ώστε να προκύπτει λύση. Έτσι, επιλέγεται να γίνει η κανονικοποίηση ελαχίστου – μεγίστου και στα δύο τμήματα της αντικειμενικής συνάρτησης. Με αυτήν τη μέθοδο κανονικοποίησης, οι αριθμητικές τιμές αντιστοιχίζονται με άλλες, οι οποίες κυμαίνονται εντός μιας προκαθορισμένης περιοχής τιμών. Συγκεκριμένα, επιλέγεται να κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 100 και 200. Η αντιστοίχιση γίνεται με γραμμικό μετασχηματισμό, σύμφωνα με τη σχέση που παρουσιάζεται παρακάτω:

$$x' = \frac{x - \min_A}{\max_A - \min_A} \cdot (\text{new_max}_A - \text{new_min}_A) + \text{new_min}_A$$

Όπου:

- A : μια μεταβλητή
- x : η εκάστοτε τιμή της μεταβλητής A προ κανονικοποίησης
- x' : η νέα τιμή
- \max_A : η μεγαλύτερη τιμή της μεταβλητής A
- \min_A : η μικρότερη τιμή της μεταβλητής A
- new_min_A : το κατώτερο όριο των νέων τιμών
- new_max_A : το ανώτερο όριο των νέων τιμών

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής, και κατ' επέκταση οι λόγοι που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί είναι το γεγονός ότι το εύρος των νέων τιμών μπορεί να προκαθοριστεί και η διασφάλιση ότι διατηρείται η αναλογία μεταξύ των τιμών που υπήρχε στα αρχικά δεδομένα.

3.6.2 Περιορισμοί

Το μαθηματικό μοντέλο, πέραν της αντικειμενικής συνάρτησης οφείλει να έχει και περιορισμούς οι οποίοι θα περιορίσουν το εύρος των πιθανών λύσεων. Οι περιορισμοί που τίθενται είναι οι εξής:

Περιορισμός 1 – Εξασφάλιση ότι το ποσοστό κάλυψης της κάθε λεωφορειακής γραμμής που επιλέγεται, είναι μεγαλύτερο μιας συγκεκριμένης τιμής:

$$X_i \leq \frac{Y_i}{Y_{min}}, \quad \forall i \in I \quad (1)$$

Όπου Y_{min} το ελάχιστο αποδεκτό ποσοστό κάλυψης γραμμής από εναέρια καλώδια.

Περιορισμός 2 – Εξασφάλιση ότι η ενέργεια που διατίθεται στα νέα τρόλεϊ από τα τμήματα καλωδίων που διέρχονται αρκεί, για να καλύψουν το υπόλοιπο της διαδρομής τους στο οποίο θα κάνουν αποκλειστικά χρήση της μπαταρίας τους:

$$X_i \leq \frac{p_i^{BAT} \cdot t_i}{2 \cdot ((1 - Y_i) \cdot l_i) \cdot EC_{average}^{BAT}}, \quad \forall i \in I \quad (2)$$

Όπου:

- $p_i^{BAT} = p_i - f_i^{tr} \cdot PD \cdot Y_i \cdot l_i, \quad \forall i \in I$

Καθορισμός της ισχύος που απομένει για τα BAT.

Η ισχύς που μένει για τα BAT σε κάθε γραμμή ισούται με τη συνολική ισχύ που παρέχει η γραμμή (με όση κάλυψη έχει) μείον την ισχύ που χρειάζονται τα συμβατικά τρόλεϊ. Αυτή, ισούται με τη συχνότητα των συμβατικών τρόλεϊ επί την ισχύ που αντλούν ανά χιλιόμετρο επί το μήκος των καλωδίων της γραμμής.

- $t_i = \frac{Y_i \cdot l_i}{v_m^{BAT}}, \quad \forall i \in I$

Ο χρόνος που βρίσκεται το BAT κάτω από τα καλώδια.

Με άλλα λόγια, ο περιορισμός αυτός εξασφαλίζει ότι η ενέργεια που προσφέρουν τα τμήματα εναέριων καλωδίων ανά γραμμή σε κάθε όχημα BAT την ώρα, είναι αρκετή για να καλύψει το υπόλοιπο κομμάτι της διαδρομής που δεν έχει καλώδια. Ο παρονομαστής πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό δύο για να διασφαλιστεί ότι η ενέργεια θα επαρκέσει στο BAT όχι μόνο για να κάνει την διαδρομή Αφετηρία → Τέρμα, αλλά και την αντίθετη.

Περιορισμός 3 – Εξασφάλιση ότι η μπαταρία του BAT επαρκεί για να διέλθει από το κάλυπτο από εναέρια καλώδια, τμήμα:

$$X_i \leq \frac{BC \cdot SoC_{max}}{(1 - Y_i) \cdot l_i \cdot EC_{average}^{BAT}}, \quad \forall i \in I \quad (3)$$

Με τον περιορισμό αυτό γίνεται η υπόθεση ότι το BAT ξεκινάει να διανύει το ακάλυπτο τμήμα με πλήρως φορτισμένη μπαταρία ($BC \cdot SoC_{max}$) και ότι το ακάλυπτο τμήμα είναι όλο συνεχόμενο και όχι σε τμήματα.

Περιορισμός 4 – Εξασφάλιση ότι η χρησιμοποιούμενη ισχύς που απομένει για τα BAT σε κάθε γραμμή δεν θα υπερβαίνει μια μέγιστη τιμή:

$$X_i \leq \frac{P_{max}}{p_i^{BAT}}, \quad \forall i \in I \quad (4)$$

Περιορισμός 5 – Εξασφάλιση ότι η χρησιμοποιούμενη ισχύς που απομένει για τα BAT συνολικά, δεν θα υπερβαίνει μια μέγιστη τιμή:

$$\sum_i X_i \cdot p_i^{BAT} \leq P_{totalmax}, \quad \forall i \in I \quad (5)$$

Οι περιορισμοί 4 και 5 διασφαλίζουν την καλή αξιοποίηση της ενέργειας που παρέχει το δίκτυο.

Περιορισμός 6 – Εξασφάλιση ότι επιλέγονται τουλάχιστον δύο γραμμές να αντικατασταθούν με BAT:

$$\sum_i X_i \geq 2, \quad \forall i \in I \quad (6)$$

3.7 Σύνοψη

Συνοψίζοντας, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε το μαθηματικό μοντέλο που διαμορφώθηκε για την επίλυση του προβλήματος επιλογής γραμμών για αντικατάσταση και δρομολόγηση των τρόλεϊ με μπαταρία. Αρχικά, αναφέρθηκε ότι το πρόβλημα προσεγγίζεται με τη μέθοδο του γραμμικού, ακέραιου προγραμματισμού και περιγράφηκε η λογική διαμόρφωσης του μοντέλου. Έπειτα, παρουσιάστηκαν οι παράμετροι με τους συμβολισμούς τους, τους οποίους ο αλγόριθμος λαμβάνει ως δεδομένα καθώς και ο συμβολισμός και η περιγραφή της μεταβλητής απόφασης. Τέλος, ξεκίνησε η ανάλυση του μοντέλου παρουσιάζοντας αρχικά την αντικειμενική συνάρτηση και κατόπιν τους περιορισμούς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται η εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου, που παρουσιάστηκε προηγουμένως, στο δίκτυο της Αθήνας με σκοπό να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητά του σε ρεαλιστικά δεδομένα. Αρχικά, παρουσιάζεται το δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε, οι παραδοχές που έγιναν αλλά, και το περιβάλλον στο οποίο έγινε η επίλυση του προβλήματος.

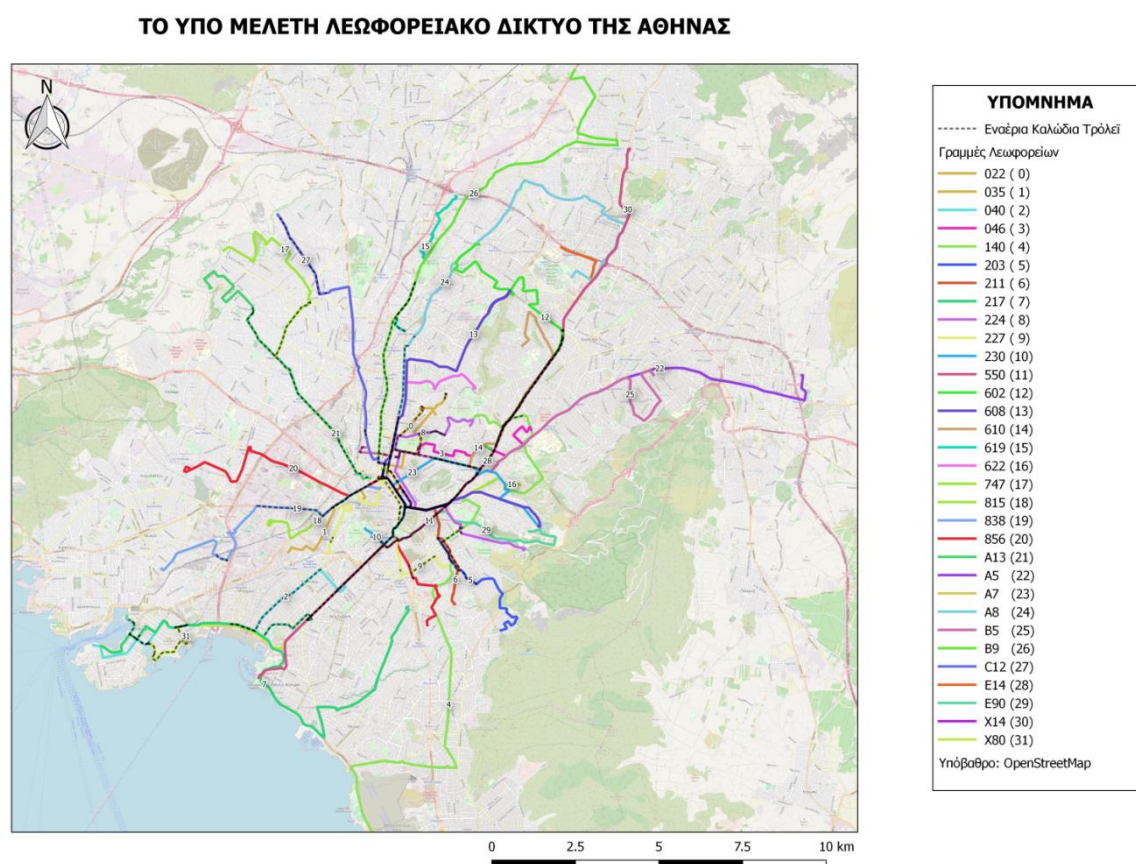
4.2 Δεδομένα Προβλήματος

Από το δίκτυο λεωφορείων που διαθέτει η Αθήνα, επιλέχθηκαν αρχικά εκείνες οι γραμμές οι οποίες επικαλύπτονται από γραμμές τρόλεϊ και έτσι, σε ένα ποσοστό τους διέρχονται από εναέρια καλώδια. Από αυτές, διαλέχτηκαν να εισαχθούν ως δεδομένα συνολικά 32 γραμμές. Η επιλογή των γραμμών αυτών έγινε, δίνοντας προτεραιότητα σε εκείνες που διέρχονται από κεντρικές αρτηρίες της πόλης. Οι γραμμές αυτές, με την ονομασία του λεωφορείου που τις διατρέχουν καθώς και την περιγραφή της διαδρομής, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4: Οι υπό εξέταση λεωφορειακές γραμμές του δικτύου της Αθήνας

A/A	Όνομα Λεωφορείου	Περιγραφή Διαδρομής
0	022	ΑΚΑΔΗΜΙΑ - ΝΕΑ ΚΥΨΕΛΗ
1	035	ΤΑΥΡΟΣ - ΠΕΤΡΑΛΩΝΑ - ΑΝΩ ΚΥΨΕΛΗ
2	040	ΠΕΙΡΑΙΑΣ - ΣΥΝΤΑΓΜΑ
3	046	ΕΛΛΗΝΟΡΩΣΣΩΝ - ΜΟΥΣΕΙΟ
4	140	ΠΟΛΥΓΩΝΟ - ΓΛΥΦΑΔΑ
5	203	ΚΑΡΕΑΣ - ΑΚΑΔΗΜΙΑ
6	211	ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ - ΑΚΑΔΗΜΙΑ
7	217	ΠΕΙΡΑΙΑΣ - ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
8	224	ΚΑΙΣΑΡΙΑΝΗ - ΕΛ. ΒΕΝΙΖΕΛΟΥ
9	227	ΑΝΩ ΠΕΤΡΑΛΩΝΑ - ΑΓΙΟΣ ΑΡΤΕΜΙΟΣ
10	230	ΑΚΡΟΠΟΛΗ - ΖΩΓΡΑΦΟΥ
11	550	ΚΗΦΙΣΙΑ - Π. ΦΑΛΗΡΟ
12	602	Ν. ΙΩΝΙΑ - ΚΑΛΟΓΡΕΖΑ - ΣΤ. ΠΑΝΟΡΜΟΥ
13	608	ΓΑΛΑΤΣΙ - ΑΚΑΔΗΜΙΑ - ΝΕΚΡ. ΖΩΓΡΑΦΟΥ
14	610	ΦΙΛΟΘΕΗ - ΑΜΠΕΛΟΚΗΠΟΙ
15	619	ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ - Ν. ΦΙΛΑΔΕΛΦΕΙΑ - ΣΤ. ΑΝΩ ΠΑΤΗΣΙΑ
16	622	ΑΝΩ ΓΑΛΑΤΣΙ - ΓΟΥΔΗ
17	747	ΠΕΤΡΟΥΠΟΛΗ - ΠΑΝΟΡΑΜΑ
18	815	ΓΟΥΔΗ - ΤΑΥΡΟΣ
19	838	ΟΜΟΝΟΙΑ - ΡΕΝΤΗΣ - ΠΑΛ. ΚΟΚΚΙΝΙΑ
20	856	ΔΑΦΝΗ - ΥΜΗΤΤΟΣ - ΑΙΓΑΛΕΩ
21	A13	ΚΗΠΟΥΠΟΛΗ - ΟΜΟΝΟΙΑ
22	A5	ΑΚΑΔΗΜΙΑ - ΑΓ. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ - ΑΝΘΟΥΣΑ
23	A7	ΣΤΟΥΡΝΑΡΗ - ΚΗΦΙΣΙΑ
24	A8	ΜΑΡΟΥΣΙ - ΝΕΑ ΙΩΝΙΑ - ΠΟΛΤΕΧΝΕΙΟ
25	B5	ΣΤ. ΛΑΡΙΣΗΣ - Λ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΑΣ - ΑΓ. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ
26	B9	ΧΑΛΚΟΚΟΝΔΥΛΗ - ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ - Ν. ΚΗΦΙΣΙΑ
27	Γ12	ΚΑΜΑΤΕΡΟ - ΑΓΙΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ
28	E14	ΣΥΝΤΑΓΜΑ - Ο.Α.Κ.Α. - ΥΠ. ΠΑΙΔΕΙΑΣ
29	E90	ΠΕΙΡΑΙΑΣ - ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥΠΟΛΗ
30	X14	ΣΥΝΤΑΓΜΑ - ΚΗΦΙΣΙΑ
31	X80	ΠΕΙΡΑΙΑΣ - ΑΚΡΟΠΟΛΗ - ΣΥΝΤΑΓΜΑ

Οι γραμμές αυτές παρουσιάζονται και γραφικά στον χάρτη που ακολουθεί:



Σχήμα 18: Το Υπό Μελέτη Λεωφορειακό Δίκτυο της Αθήνας

Όπως περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 3.3, αντλήθηκαν από τα δεδομένα “shapfiles”, πληροφορίες όπως τα μήκη των 32 επιλεχθέντων λεωφορειακών γραμμών καθώς, και τα μήκη των τμημάτων εναέριων καλωδίων ανά γραμμή. Έτσι, με μια απλή πράξη, γίνεται εύρεση του ποσοστού κάλυψης. Τα δεδομένα αυτά, παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 5: Μήκη Λεωφορειακών Γραμμών και Ποσοστά Κάλυψης από Εναέρια Καλώδια

A/A	Όνομα Γραμμής	Μήκος Λεωφορειακής Γραμμής I_i (km)	Μήκος Εναέριων Καλωδίων (km)	Ποσοστό Κάλυψης Y_i (%)
0	022	4.02	3.31	82.3
1	035	9.99	3.77	37.7
2	040	13.13	7.01	53.4

3	046	6.95	1.32	19.0
4	140	27.91	2.75	9.8
5	203	7.73	3.24	41.9
6	211	4.81	2.32	48.2
7	217	16.92	1.30	7.7
8	224	9.79	3.75	38.3
9	227	10.21	4.07	39.9
10	230	9.35	3.21	34.3
11	550	20.99	11.97	57.0
12	602	11.91	4.16	34.9
13	608	13.95	5.08	36.4
14	610	9.01	3.59	39.8
15	619	6.08	2.36	38.8
16	622	10.50	4.62	44.0
17	747	7.30	2.00	27.3
18	815	9.86	4.75	48.2
19	838	10.20	4.37	42.8
20	856	13.74	3.57	25.9
21	A13	10.17	6.33	62.2
22	A5	15.10	3.26	21.6
23	A7	14.77	7.56	51.2
24	A8	17.08	3.95	23.1
25	B5	13.22	3.14	23.7
26	B9	18.16	5.91	32.5
27	Γ12	9.71	3.05	31.4
28	Ε14	11.87	8.09	68.2
29	Ε90	17.65	7.25	41.1
30	Χ14	14.56	8.09	55.6
31	Χ80	14.03	6.52	46.5

Όσον αφορά τη συχνότητα των νέων τρόλεϊ με μπαταρία λαμβάνονται τυχαίες τιμές ανά γραμμή, μεταξύ 9 και 13 οχημάτων την ώρα. Το μέγεθος αυτό, ταυτίζεται με τη συχνότητα των ντιζελοκίνητων λεωφορείων που διέρχονται από την εκάστοτε γραμμή, δεδομένο που δεν ήταν εύκολο να αποκτηθεί. Όσο για τη συχνότητα διέλευσης των συμβατικών τρόλεϊ, θεωρήθηκε ίση με 20 οχήματα την ώρα σε κάθε γραμμή ($f_i^{tr} = 20$ οχήματα/h).

Όσον αφορά την ισχύ που παρέχουν τα καλώδια, συνολικά σε κάθε γραμμή, υπολογίζεται προσεγγιστικά με την εξής μέθοδο. Θεωρείται ότι ανά 100 m καλωδίων υπάρχει υποσταθμός που δίνει στο σύστημα, ρεύμα ισχύος 100 kW. Έτσι, γνωρίζοντας τα μήκη των τμημάτων εναέριων καλωδίων σε κάθε γραμμή, προσεγγίζεται η τιμή της συνολικής παρεχόμενης ισχύος. Αναφέρεται ως συνολική, διότι, η ισχύς αυτή παρέχεται για τα συμβατικά τρόλεϊ και όση απομένει μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα νέα τρόλεϊ με μπαταρία. Η μέση τιμή ισχύος που αντλούν τα

συμβατικά τρόλει από τα εναέρια καλώδια λαμβάνεται ίση με 30 kW ανά χιλιόμετρο ($PD = 30 \text{ kW/km}$).

Ο χρόνος κύκλου του BAT σε κάθε γραμμή t_i^{cycle} (h), δηλαδή πόσο χρόνο χρειάζεται το όχημα να διανύσει τη διαδρομή από την αφετηρία στο τέρμα και να επιστρέψει, υπολογίζεται εύκολα με τον ακόλουθο τύπο:

$$t_i^{cycle} = \frac{2 \cdot l_i}{V_m^{BAT}}, \quad \forall i \in I$$

Η χρονοαπόσταση είναι ο μέσος χρόνος ανάμεσα σε δύο διαδοχικές διελεύσεις λεωφορείων από μια διατομή του οδικού τμήματος. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, η χρονοαπόσταση μεταξύ των οχημάτων BAT σε όλες τις γραμμές θεωρείται ίση με $hw = 0.1 \text{ h}$, δηλαδή 6 λεπτά.

Σε άρθρο των Feng Mao, Zhiheng Li και Kai Zhang που δημοσιεύτηκε τον Δεκέμβριο του 2020, γίνεται λόγος για την εκτίμηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα σε περίπτωση που ηλεκτροδοτηθούν οι συμβατικές ντίζελ λεωφορειακές γραμμές. Τα αποτελέσματα πειραμάτων που διεξήχθησαν το 2018 έδειξαν ότι τα ηλεκτρικά λεωφορεία με μπαταρία – BEBs (Battery Electric Buses) – μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα WTW (Well-to-Well) κατά 21,8% σε σχέση με τα συμβατικά λεωφορεία diesel (CDB). Γενικά, η «στροφή» σε ηλεκτρικά οχήματα και κυρίως όταν αυτά χρησιμοποιούνται για την αστική συγκοινωνία, έχει θεωρηθεί ως ένα μέτρο το οποίο συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών CO₂ παγκοσμίως (Ma et al., 2017, Ziyadi et al., 2018). Έτσι, από το άρθρο των Feng et.al και συγκεκριμένα από τον παρακάτω πίνακα που δημιουργήθηκε μέσω της μελέτης αυτού, αντλήθηκε η τιμή για τους ρύπους που εκπέμπονται από τα ντιζελοκίνητα λεωφορεία, $emi = 1.19 \text{ kg/km}$.

Πίνακας 6: Συντελεστές εκπομπών CO₂ ανά τύπο οχήματος

Συντελεστές εκπομπών CO ₂			
	Well – to – Tank (WTT)	Tank – to – Well (TTW)	Total (WTW)
CDB (Diesel)	0.32 kg/km	0.87 kg/km	1.19 kg/km
BEB	0.64 kg/km	0.29 kg/km	0.93 kg/km

Όσο για τη μετατροπή των εκπομπών αυτών σε οικονομικό κόστος βρέθηκε, από το “Environmental Prices Handbook EU28 version, CE Delft”, μια τιμή, η οποία αποτελεί σταθμισμένο συντελεστή. Έτσι, το περιβαλλοντικό κόστος σε € για τις εκπομπές CO₂ στην ατμόσφαιρα λαμβάνεται ίσο με C_{em} = 0.057 €/kg, όπως φαίνεται και από τους πίνακες που ακολουθούν:

Pollutant		Environmental price (€/kg emission)			Relevant midpoints ¹							Endpoints ¹		
		Lower	Central	Upper	PM formation	Smog formation	Acidification	Climate change	Ozone layer	Human toxicity	Ecotox. / Eutrophication	Human health	Ecosystem services	Materials/ Buildings
Carbon dioxide ²	CO ₂	€ 0.022	€ 0.057	€ 0.094				x				nc	nc	nc
Chlorofluorocarbons ²	CFC11	€ 130	€ 306	€ 504				x	x	x	x	x	x	
Fine particulates, 2.5 μ or less	PM _{2.5}	€ 27.7	€ 38.7	€ 59.5	x			nc				x		x
Coarse particulates, 10 μ or less	PM ₁₀	€ 19	€ 26.6	€ 41	x			nc				x		x
Nitrogen oxides	NO _x	€ 9.97	€ 14.8	€ 22.1	x	x	x	nc			x	x	x	x
Sulphur dioxide	SO ₂	€ 8.3	€ 11.5	€ 17.9	x	x	x	nc				x	x	x
Ammonia	NH ₃	€ 10	€ 17.5	€ 25.2	x		x				x	x	x	
Volatile organic compounds	NMVO C	€ 0.84	€ 1.15	€ 1.84		x						x	x	X
Carbon monoxide	CO	€ 0.0383	€ 0.0526	€ 0.0918		x						x		
Methane ²	CH ₄	€ 0.673	€ 1.74	€ 2.91		x		x				nc	nc	nc
Cadmium	Cd	€ 371	€ 589	€ 869						x	x	x	x	
Arsenic	As	€ 586	€ 862	€ 963						x	x	x	x	
Lead	Pb	€ 3631	€ 5367	€ 5761						x	x	x	x	
Mercury	Hg	€ 24680	€ 34490	€ 52920						x	x	x	x	
Formaldehyde	CH ₂ O	€ 9	€ 12.3	€ 19	x					x	x	x	x	

Σχήμα 19: Πίνακας Περιβαλλοντικών Τιμών για τις εκπομπές στην ατμόσφαιρα (€/kg)

Impact category	Unit	Environmental price as weighting factor	Environmental price as external cost
Climate change	€/kg CO ₂ -eq.	€ 0.057	€ 0.057
Ozone layer depletion	€/kg CFC-eq.	€ 123	€ 30.4
Human toxicity	€/kg 1,4 DB-eq.	€ 0.0894	€ 0.0991
Photochemical oxidant formation	€/kg NMVOC-eq.	€ 1.15	€ 1.15

Σχήμα 20: Πίνακας Περιβαλλοντικών Τιμών ανά κατηγορία επίπτωσης στο περιβάλλον (€/kg)

Επιπλέον, το κόστος αγοράς του κάθε νέου τρόλεϊ με μπαταρία λαμβάνεται ίσο με C_{inv} = 1,000,000 €. Τέλος, όσον αφορά τις τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 7: Τιμές υπόλοιπων παραμέτρων

Περιγραφή Παραμέτρου	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
Μέση Ταχύτητα BAT	V_m^{BAT}	12	km/h
Μέση Κατανάλωση Ενέργειας BAT	$EC_{average}^{BAT}$	2.5	kWh/km
Χωρητικότητα Μπαταρίας BAT	BC	60	kWh
Μέγιστο Επιτρεπόμενο Επίπεδο Φόρτισης της μπαταρίας	SoC_{max}	80	%
Το ελάχιστο αποδεκτό ποσοστό κάλυψης	Y_{min}	20	%
Η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή χρησιμοποιούμενης ισχύς ανά γραμμή	P_{max}	4000	kW
Η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή χρησιμοποιούμενης ισχύς συνολικά	$P_{totalmax}$	25000	kW

4.3 Παραδοχές

Μία βασική παραδοχή που έγινε κατά την διαμόρφωση και επίλυση του μαθηματικού μοντέλου και αξίζει να αναφερθεί είναι η εξής:

- Θεωρήθηκε ότι οι διαδρομές των λεωφορείων από την αφετηρία προς το τέρμα και αντίστροφα, ταυτίζονται, ενώ στην πραγματικότητα υπάρχουν μικρές διαφοροποιήσεις. Για να συνυπολογιστούν, όσο γίνεται, και οι αποκλίσεις αυτές, κρίθηκε ορθότερο να ληφθεί ο μέσος όρος για το μήκος της κάθε διαδρομής ως μια μέση τιμή, πιο αντιπροσωπευτική, και αντίστοιχα έγινε και για το ποσοστό κάλυψης από τα εναέρια καλώδια στην κάθε γραμμή. Στον παρακάτω πίνακα, φαίνονται ενδεικτικά κάποιες από τις υπό εξέταση γραμμές με τους υπολογισμούς που έγιναν:

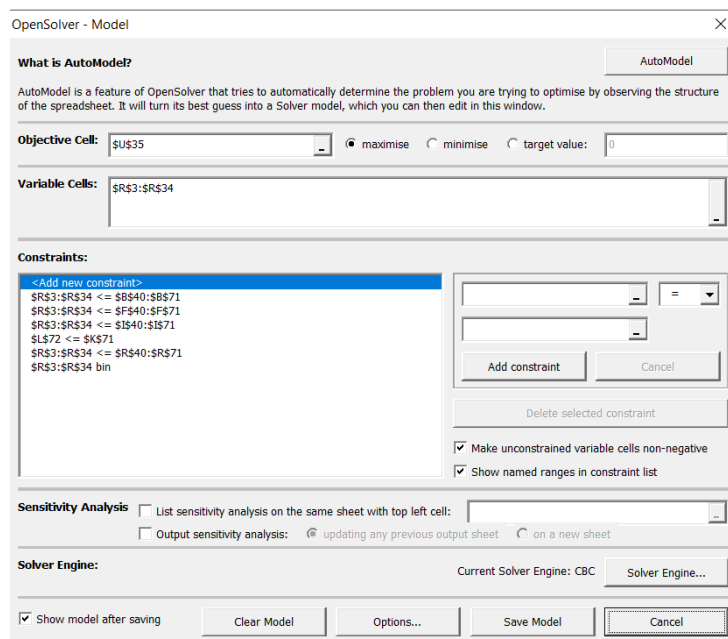
α/α	Όνομα Γραμμής	Περιγραφή	Μήκος Λεωφορειακής Γραμμής (km)	Μέσο Μήκος Λεωφορειακής Γραμμής (km)	Μήκος Καλωδίων Τρόλεϊ (km)	Μέσο Μήκος Καλωδίων Τρόλεϊ (km)	Ποσοστό Κάλυψης (%)	Μέσο Ποσοστό Κάλυψης (%)
0	022	ΑΚΑΔΗΜΙΑ - ΝΕΑ ΚΥΨΕΛΗ	3.88	4.02	3.37	3.31	0.87	0.82
			4.15		3.24		0.78	
1	035	ΤΑΥΡΟΣ - ΠΕΤΡΑΛΩΝΑ - ΑΝΩ ΚΥΨΕΛΗ	9.88	9.99	3.25	3.77	0.33	0.38
			10.1		4.28		0.42	
2	040	ΠΕΙΡΑΙΑΣ - ΣΥΝΤΑΓΜΑ	13.31	13.13	7.62	7.01	0.57	0.53
			12.94		6.4		0.49	
3	046	ΕΛΛΗΝΟΡΩΣΩΝ - ΜΟΥΣΕΙΟ	6.41	6.95	1.2	1.32	0.19	0.19
			7.49		1.44		0.19	
4	140	ΠΟΛΥΓΩΝΟ - ΓΛΥΦΑΔΑ	28.01	27.91	2.59	2.75	0.09	0.10
			27.81		2.9		0.10	
5	203	ΚΑΡΕΑΣ - ΑΚΑΔΗΜΙΑ	7.42	7.73	3.34	3.24	0.45	0.42
			8.04		3.14		0.39	

Σχήμα 21: Απόσπασμα Πίνακα Υπολογισμού Τελικών Μηκών και Ποσοστών Κάλυψης έπειτα της παραδοχής

4.4 Περιβάλλον Επίλυσης

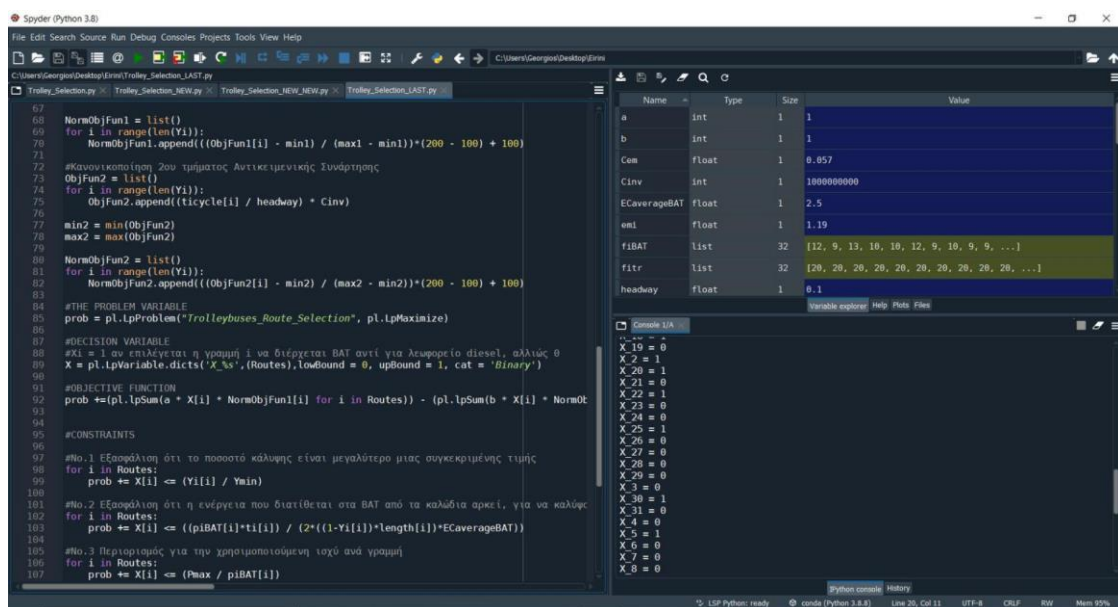
Το μοντέλο επίλυσης του υπό εξέταση προβλήματος που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη δημιουργήθηκε εξ' αρχής από τον μελετητή της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Το μοντέλο επιλύθηκε σε δύο προγραμματιστικά περιβάλλοντα.

Αρχικό περιβάλλον εργασίας αποτέλεσε το υπολογιστικό φύλλο "Excel" και συγκεκριμένα η επέκταση "Open Solver" που εγκαταστάθηκε, με σκοπό την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Ως μηχανή επίλυσης του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε ο γραμμικός solver COIN-OR Couenne. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η τυπική μορφή περιβάλλοντος του συγκεκριμένου λογισμικού:



Σχήμα 22: Τυπική μορφή περιβάλλοντος "Open Solver"

Έπειτα, αναπτύχθηκε κώδικας στη γλώσσα προγραμματισμού “Python 3” με την βοήθεια του προγραμματιστικού περιβάλλοντος “Anaconda Navigator 3.0” – “Spyder 3.8” και της βιβλιοθήκης “PuIP” της “Python”, η οποία διευκολύνει την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Η “Python” αποτελεί μία γλώσσα υψηλού επιπέδου προγραμματισμού με κύρια χαρακτηριστικά της, την ευκολία χρήσης και το απλό συντακτικό της, τα οποία επιτρέπουν στους προγραμματιστές να εκφράσουν έννοιες σε λιγότερες γραμμές κώδικα, σε σχέση με άλλες γλώσσες προγραμματισμού. Επίσης, διαθέτει πολλές βιβλιοθήκες οι οποίες καθιστούν την εκτέλεση κάποιων εργασιών ευκολότερη. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η τυπική μορφή περιβάλλοντος του προγράμματος “Spyder”:



Σχήμα 23: Τυπική μορφή προγραμματιστικού περιβάλλοντος “Spyder”

Τέλος, αναφέρεται ότι ο κώδικας που δημιουργήθηκε αλλά και το “Excel”, εκτελέστηκαν σε υπολογιστή με επεξεργαστή 2.9 GHz και μνήμη RAM 8 GB και ο χρόνος επίλυσης δεν ξεπέρασε τα 2 δευτερόλεπτα.

4.5 Σύνοψη

Συνοψίζοντας, στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου, το οποίο διαμορφώθηκε προηγουμένως. Η εφαρμογή έγινε με ρεαλιστικά δεδομένα και συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το δίκτυο λεωφορείων και τρόλεϊ της Αθήνας, με σκοπό να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου.

Αρχικά, έγινε μια παρουσίαση του δικτύου και δόθηκαν τιμές σε όλες τις παραμέτρους που χρησιμοποιεί το μοντέλο. Κατόπιν, περιγράφηκαν οι παραδοχές που έγιναν και τέλος παρουσιάστηκαν τα δύο προγραμματιστικά περιβάλλοντα επίλυσης του μοντέλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν, έπειτα από την εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου το οποίο παρουσιάστηκε εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στην αρχή, επιλέγονται κάποιες τιμές για τις παραμέτρους του μοντέλου και παρουσιάζονται αποτελέσματα για 3 πιθανά σενάρια που προκύπτουν από τη μεταβολή των βαρών στην αντικειμενική συνάρτηση. Έπειτα, γίνεται ανάλυση ευαισθησίας, στην οποία γίνονται διάφορες μεταβολές στις τιμές των παραμέτρων με σκοπό να διερευνηθεί ο βαθμός στον οποίο επιδρούν οι παράμετροι στο τελικό αποτέλεσμα. Τέλος, τα αποτελέσματα συνοψίζονται και εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα.

5.2 Επιλογή Παραμέτρων

Με σκοπό να εφαρμοστεί το μοντέλο και να εξαχθούν αποτελέσματα θα πρέπει αρχικά να οριστούν οι τιμές για τις βασικές παραμέτρους αυτού. Οι τιμές αυτές παρουσιάστηκαν εκτενώς στο Κεφάλαιο 4 και συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 8: Αρχικές τιμές παραμέτρων

Περιγραφή Παραμέτρου	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
Ισχύς που αντλούν τα συμβατικά τρόλεϊ από τα καλώδια	PD	30	kW/km
Μέση Χρονοαπόσταση BAT	hw	0.1	h
Μέση Ταχύτητα BAT	V_m^{BAT}	12	km/h
Μέση Κατανάλωση Ενέργειας BAT	EC_{average}^{BAT}	2.5	kWh/km
Χωρητικότητα Μπαταρίας BAT	BC	60	kWh
Μέγιστο Επιτρεπόμενο Επίπεδο Φόρτισης της μπαταρίας	SoC_{max}	80	%
Το ελάχιστο αποδεκτό ποσοστό κάλυψης	Y_{min}	20	%

Η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή χρησιμοποιούμενης ισχύς ανά γραμμή	P_{max}	4000	kW
Η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή χρησιμοποιούμενης ισχύς συνολικά	$P_{totalmax}$	25000	kW
Κόστος αγοράς BAT	C_{inv}	10^6	€
Κόστος μόλυνσης του ατμοσφαιρικού αέρα	C_{em}	0.057	€/kg

Το μοντέλο καταλήγει σε αποτελέσματα, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους που έχουν προκαθοριστεί. Ωστόσο, για να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα για την αξιολόγηση αυτού καθώς και για τον καλύτερο σχεδιασμό αποφασίζεται να διεξαχθούν ορισμένα σενάρια τα οποία στηρίζονται στα βάρη των παραμέτρων της αντικειμενικής συνάρτησης. Τα βάρη αυτά, σχετίζονται με την προτεραιότητα που δίνεται στους δύο καθοριστικούς σχεδιαστικούς στόχους του μοντέλου, τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα από τα ντιζελοκίνητα λεωφορεία και το επενδυτικό κόστος για τα νέα τρόλεϊ.

5.2.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Σεναρίου 0

Το σενάριο 0, αποτελεί το βασικό σενάριο στο οποίο δίνεται ίσο βάρος στους δύο σχεδιαστικούς στόχους του μοντέλου. Τα βάρη του σεναρίου 0 παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 9: Βάρη Σεναρίου 0

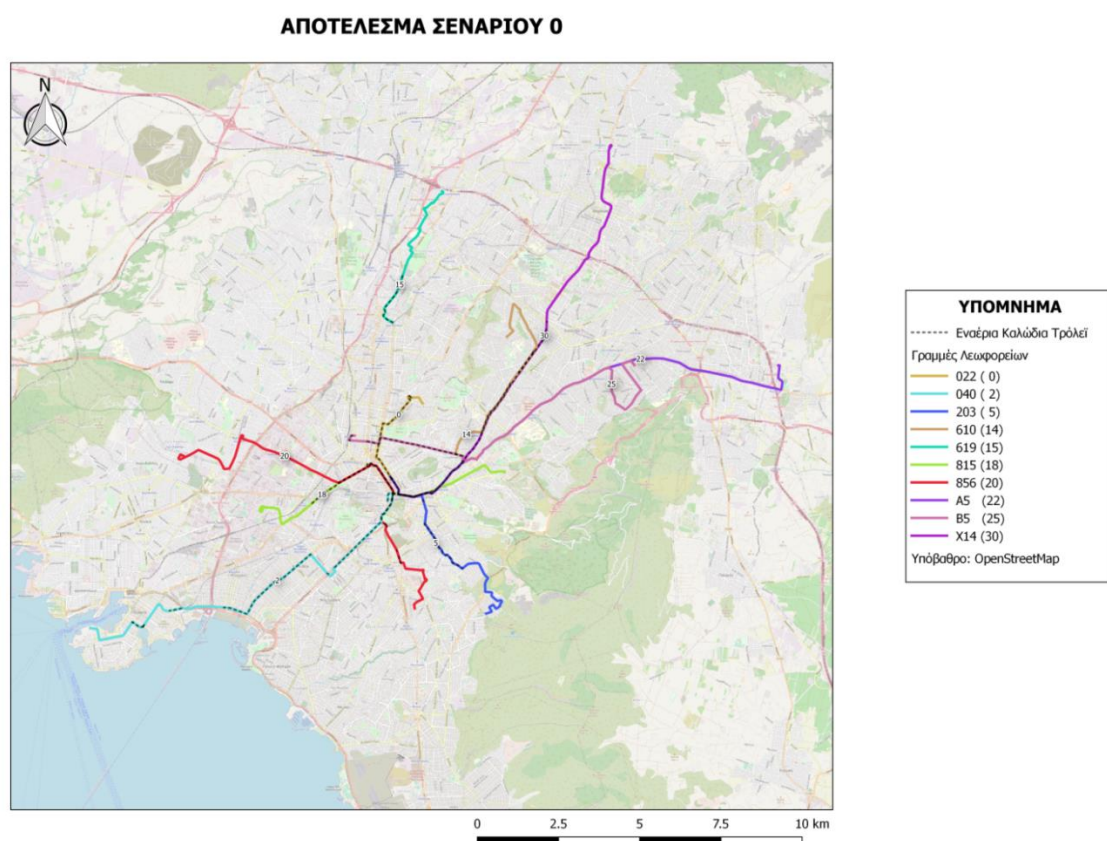
Στόχοι Αντικειμενικής Συνάρτησης	Βάρη Σεναρίου 0
Εκπομπές CO ₂	a = 1
Επενδυτικό Κόστος	b = 1

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του σεναρίου 0 φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 10: Αποτελέσματα Σεναρίου 0

ΣΕΝΑΡΙΟ 0			
Οι γραμμές που επιλέγονται	Ονομασία Γραμμών	Περιβαλλοντικό Κόστος που εξοικονομείται	Κόστος Επένδυσης
0	022	102.1	100.0
2	040	154.0	138.1
5	203	121.0	115.5
14	610	131.3	120.9
15	619	115.2	108.6
18	815	131.8	124.5
20	856	151.6	140.7
22	A5	164.9	146.4
25	B5	148.9	138.5
30	X14	161.9	144.1
ΣΥΝΟΛΟ:	10 γραμμές	1382.7	1277.4

Τα αποτελέσματα αυτά, παρουσιάζονται και στον χάρτη που ακολουθεί:



Σχήμα 24: Χαρτογραφική Απεικόνιση Αποτελέσματος Σεναρίου 0

Από τα αποτελέσματα του σεναρίου 0, παρατηρείται ότι επιλέγονται να αντικατασταθούν συνολικά 10 λεωφορειακές γραμμές από τις 32 που εισάγονται. Το σενάριο αυτό, λόγω του ότι είναι το βασικό σενάριο είναι λογικό οι τιμές των παραμέτρων της αντικειμενικής συνάρτησης να μην έχουν μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους. Να σημειωθεί ότι οι τιμές που φαίνονται στον πίνακα για το περιβαλλοντικό κόστος που εξοικονομείται και το κόστος επένδυσης είναι κανονικοποιημένες τιμές.

5.2.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Σεναρίου 1 - Έμφαση στο Περιβάλλον

Στο σενάριο 1, δίνεται σημαντική προτεραιότητα στην μεγιστοποίηση των εκπομπών CO₂ που εξοικονομούνται και λιγότερη στο συνολικό κόστος επένδυσης στα νέα τρόλεϊ. Τα βάρη του σεναρίου 1 παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 11: Βάρη Σεναρίου 1

Στόχοι Αντικειμενικής Συνάρτησης	Βάρη Σεναρίου 1
Εκπομπές CO ₂	a = 0.9
Επενδυτικό Κόστος	b = 0.1

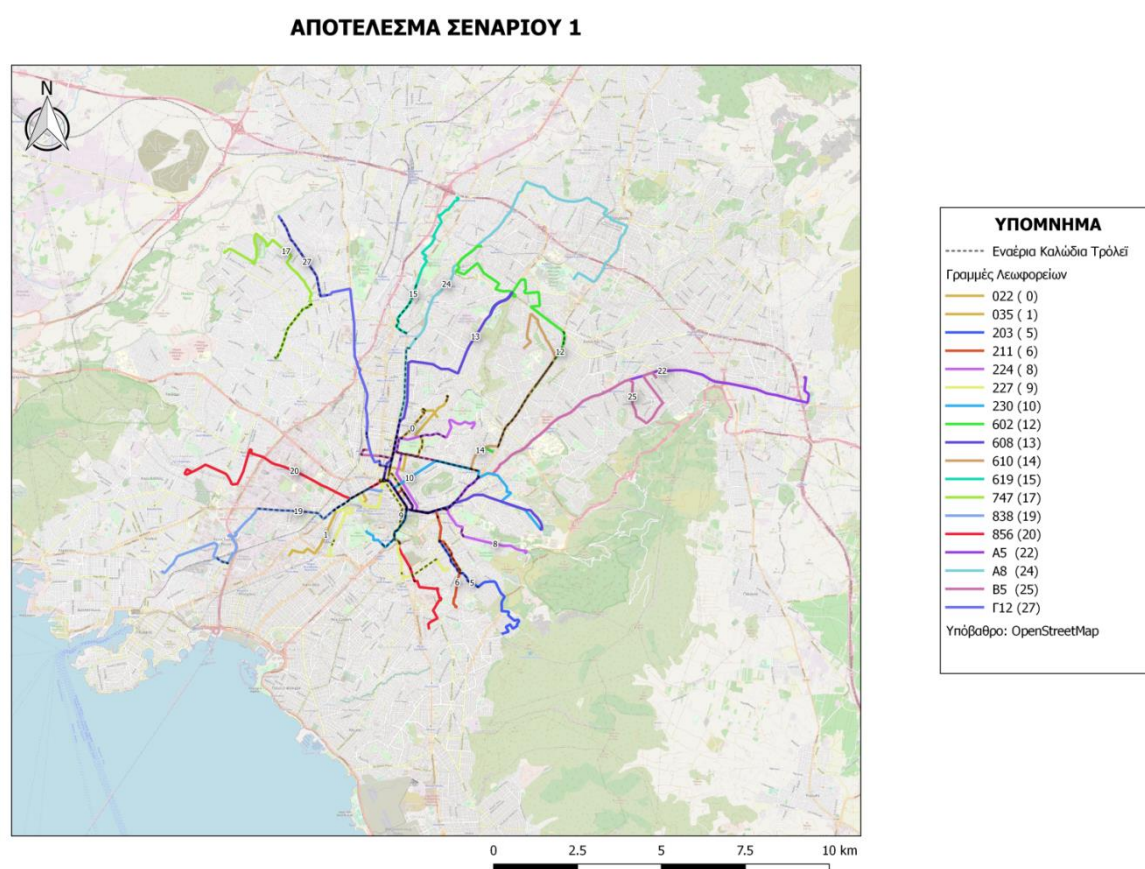
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του σεναρίου 1 φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 12: Αποτελέσματα Σεναρίου 1

ΣΕΝΑΡΙΟ 1			
Οι γραμμές που επιλέγονται	Ονομασία Γραμμών	Περιβαλλοντικό Κόστος που εξοικονομείται	Κόστος Επένδυσης
0	022	102.1	100
1	035	119.8	125.0
5	203	121.0	115.5
6	211	100.0	103.3
8	224	119.0	124.2
9	227	120.6	125.9
10	230	117.3	122.3
12	602	132.1	133.0
13	608	140.8	141.6
14	610	131.3	120.9
15	619	115.2	108.6

17	747	112.6	113.7
19	838	124.9	125.9
20	856	151.6	140.7
22	A5	164.9	146.4
24	A8	154.1	154.7
25	B5	148.9	138.5
27	Γ12	122.8	123.8
ΣΥΝΟΛΟ:	18 γραμμές	2069.2	226.4

Τα αποτελέσματα αυτά, παρουσιάζονται και στον χάρτη που ακολουθεί:



Σχήμα 25: Χαρτογραφική Απεικόνιση Αποτελέσματος Σεναρίου 1

Από τα αποτελέσματα του σεναρίου 1 παρατηρείται ότι επιλέγονται να αντικατασταθούν συνολικά 18 λεωφορειακές γραμμές από τις 32 που εισάγονται. Το σενάριο αυτό, δίνοντας μεγαλύτερη βαρύτητα στο περιβαλλοντικό κόστος που εξοικονομείται, η τιμή αυτού είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του κόστους. Να

σημειωθεί ότι οι τιμές που φαίνονται στον πίνακα για το περιβαλλοντικό κόστος που εξοικονομείται και το κόστος επένδυσης είναι κανονικοποιημένες τιμές.

5.2.3 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Σεναρίου 2 - Έμφαση στο Κόστος

Σε αντίθεση με το σενάριο 1, στο σενάριο 2 δίνεται σημαντική προτεραιότητα στην ελαχιστοποίηση του επενδυτικού κόστους και λιγότερη στη μεγιστοποίηση των εκπομπών CO₂ που εξοικονομούνται. Τα βάρη του σεναρίου 2 παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 13: Βάρη Σεναρίου 2

Στόχοι Αντικειμενικής Συνάρτησης	Βάρη Σεναρίου 2
Εκπομπές CO ₂	a = 0.1
Επενδυτικό Κόστος	b = 0.9

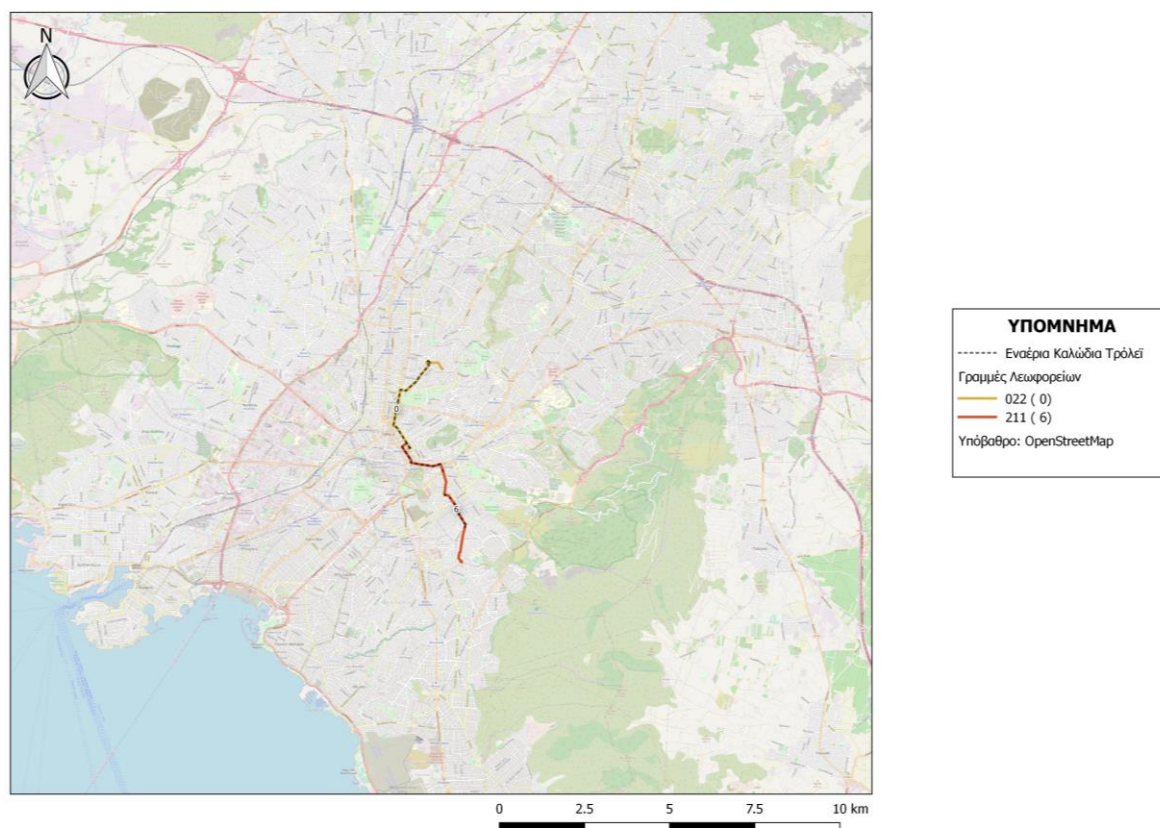
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του σεναρίου 2 φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 14: Αποτελέσματα Σεναρίου 2

ΣΕΝΑΡΙΟ 2			
Οι γραμμές που επιλέγονται	Ονομασία Γραμμών	Περιβαλλοντικό Κόστος που εξοικονομείται	Κόστος Επένδυσης
0	022	102.1	100.0
6	211	100	103.3
ΣΥΝΟΛΟ:	2 γραμμές	20.2	183.0

Τα αποτελέσματα αυτά, παρουσιάζονται και στον χάρτη που ακολουθεί:

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΣΕΝΑΡΙΟΥ 2



Σχήμα 26: Χαρτογραφική Απεικόνιση Αποτελέσματος Σεναρίου 2

Από τα αποτελέσματα του σεναρίου 2, παρατηρείται ότι επιλέγονται να αντικατασταθούν μόλις 2 λεωφορειακές γραμμές από τις 32 που εισάγονται. Το σενάριο αυτό, δίνοντας μεγαλύτερη βαρύτητα στο κόστος επένδυσης, επιλέγει τις ελάχιστες δυνατές. Να σημειωθεί ότι οι τιμές που φαίνονται στον πίνακα για το περιβαλλοντικό κόστος που εξοικονομείται και το κόστος επένδυσης είναι κανονικοποιημένες τιμές.

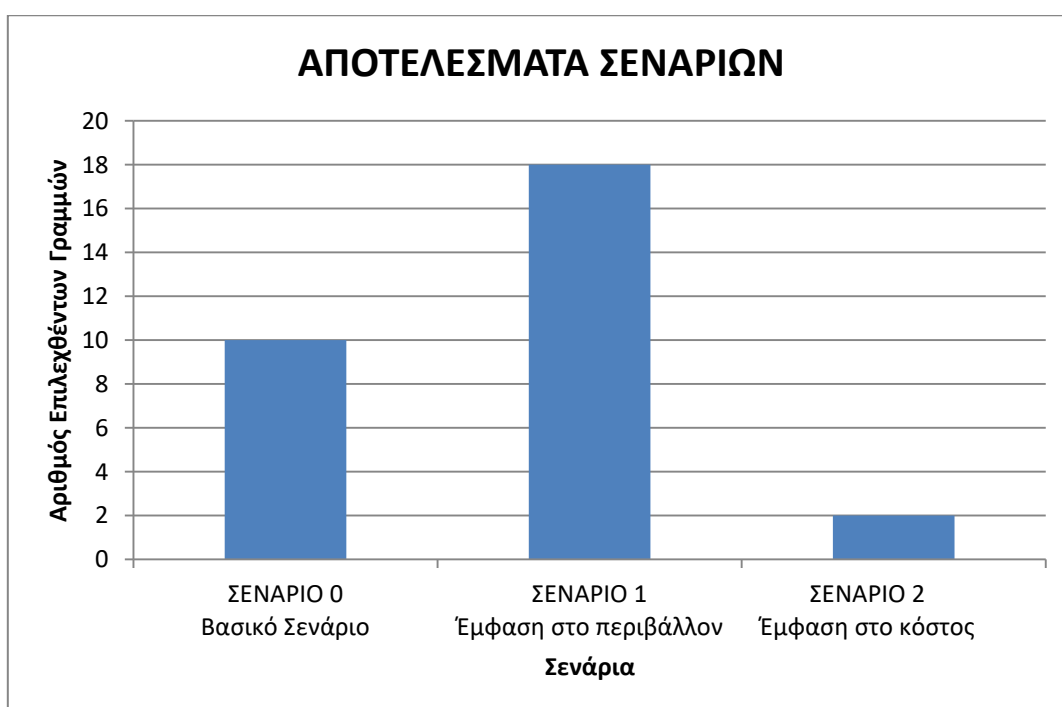
5.2.4 Σύγκριση Αποτελεσμάτων των Τριών Σεναρίων

Αρχικά πρέπει να αναφερθεί ότι η επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης για τα τρία σενάρια που παρουσιάστηκαν παραπάνω έδωσε τη βέλτιστη λύση, σύμφωνα με την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς που έχουν τεθεί.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των τριών σεναρίων, παρατηρείται ότι στο σενάριο 1 επιλέχθηκαν να αντικατασταθούν περισσότερες γραμμές, 18 συγκεκριμένα, από εκείνες που επιλέχθηκαν στο σενάριο 0, ενώ το σενάριο 2, πολύ

λιγότερες, μόλις 2. Η παρατήρηση αυτή που εξάγεται από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι το μαθηματικό μοντέλο εξάγει λογικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, στο σενάριο 1, το οποίο δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα στη μείωση των εκπομπών CO₂ στο περιβάλλον, είναι αναμενόμενο να επιλεγούν πολλές, σχετικά, γραμμές για αντικατάσταση των οχημάτων τους από τα νέα ΒΑΤ καθώς, όσες περισσότερες οι επιλεγμένες γραμμές, τόσο μεγαλύτερη η εξοικονόμηση των εκπομπών CO₂ από τα ντιζελοκίνητα λεωφορεία που αποσύρονται. Όμοια και στο σενάριο 2, το οποίο δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα στο κόστος επένδυσης για τα νέα οχήματα ΒΑΤ, επιλέγονται λιγότερες γραμμές και μάλιστα εκείνες με το χαμηλότερο κόστος. Τέλος, το σενάριο 0 δίνει μια μέση λύση, συνυπολογίζοντας με την ίδια βαρύτητα και τις εκπομπές CO₂ αλλά και το κόστος, επιλέγοντας συνολικά 10 γραμμές από τις 32 εισαχθέντες.

Τα αποτελέσματα των τριών σεναρίων φαίνονται και στο γράφημα που ακολουθεί:



Σχήμα 27: Σύγκριση Αποτελεσμάτων Σεναρίων μέσω Γραφήματος

5.3 Ανάλυση Ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιείται με απώτερο σκοπό την ποιοτική περιγραφή του βαθμού επιρροής κάθε παραμέτρου στα αποτελέσματα του μοντέλου. Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε, διατηρώντας τα βάρη a και b ίσα με τη μονάδα, για τις ακόλουθες παραμέτρους:

- i. Ελάχιστο αποδεκτό ποσοστό κάλυψης από εναέρια καλώδια (Y_{min}),
- ii. Χωρητικότητα της μπαταρίας (BC),
- iii. Μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή χρησιμοποιούμενης ισχύος ανά γραμμή (P_{max}) και
- iv. Μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή χρησιμοποιούμενης ισχύος συνολικά ($P_{totalmax}$).

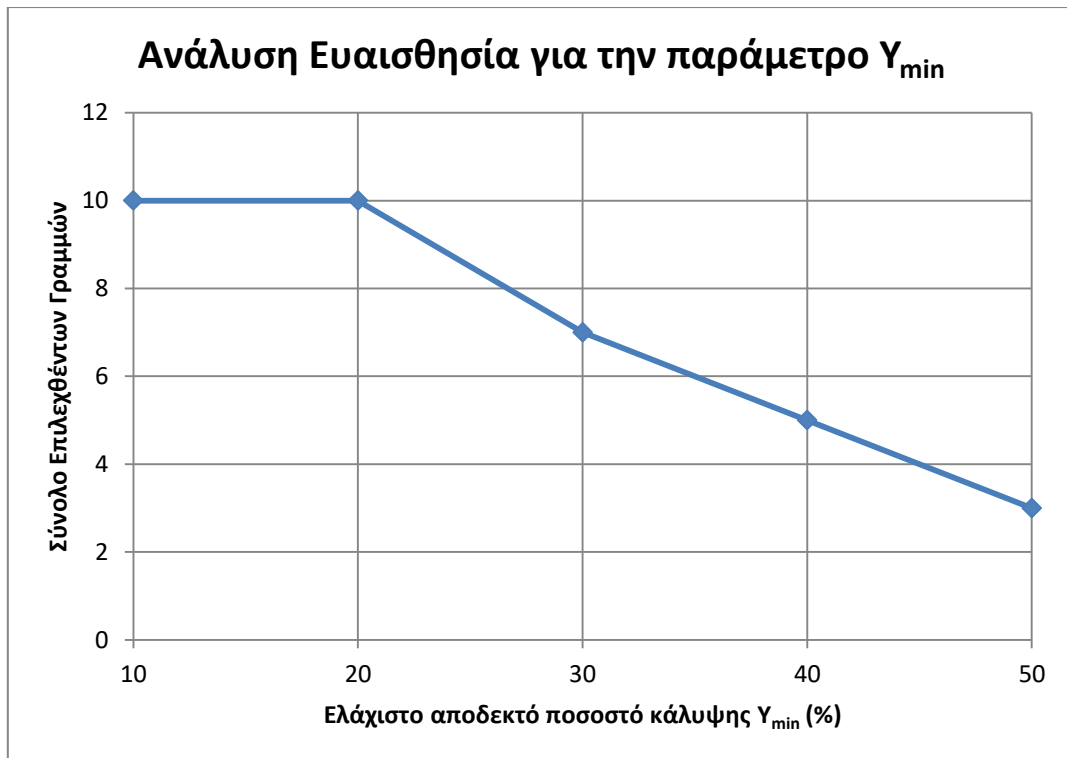
Οι παράμετροι, οι μεταβολές αυτών, καθώς και τα αποτελέσματα κάθε περίπτωσης παρουσιάζονται στους πίνακες και στα διαγράμματα που ακολουθούν:

i. Ελάχιστο αποδεκτό ποσοστό κάλυψης Y_{min}

Για την ανάλυση ευαισθησίας του μαθηματικού μοντέλου μεταβάλλοντας την παράμετρο Y_{min} χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές 10, 20, 30, 40 και 50 % κάλυψη, με αρχική την τιμή 20%.

Πίνακας 15: Ανάλυση Ευαισθησίας για την παράμετρο Y_{min}

Ελάχιστο αποδεκτό ποσοστό κάλυψης Y_{min} (%)	Επιλεχθείσες Λεωφορειακές Γραμμές	Σύνολο Επιλεχθέντων Γραμμών
10	0, 2, 5, 14, 15, 18, 20, 22, 25, 30	10
20 (Αρχική τιμή)	0, 2, 5, 14, 15, 18, 20, 22, 25, 30	10
30	0, 2, 5, 14, 15, 18, 30	7
40	0, 2, 5, 18, 30	5
50	0, 2, 30	3



Σχήμα 28: Ανάλυση Ευαισθησίας για την παράμετρο Y_{min}

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι όσο αυξάνεται το ελάχιστο αποδεκτό ποσοστό κάλυψης, τόσο μειώνεται ο αριθμός των επιλεχθέντων γραμμών. Παρατηρείται μια γραμμική μείωση με τις τιμές 10 και 20 % να παρουσιάζουν όμοιο σύνολο επιλεχθέντων γραμμών.

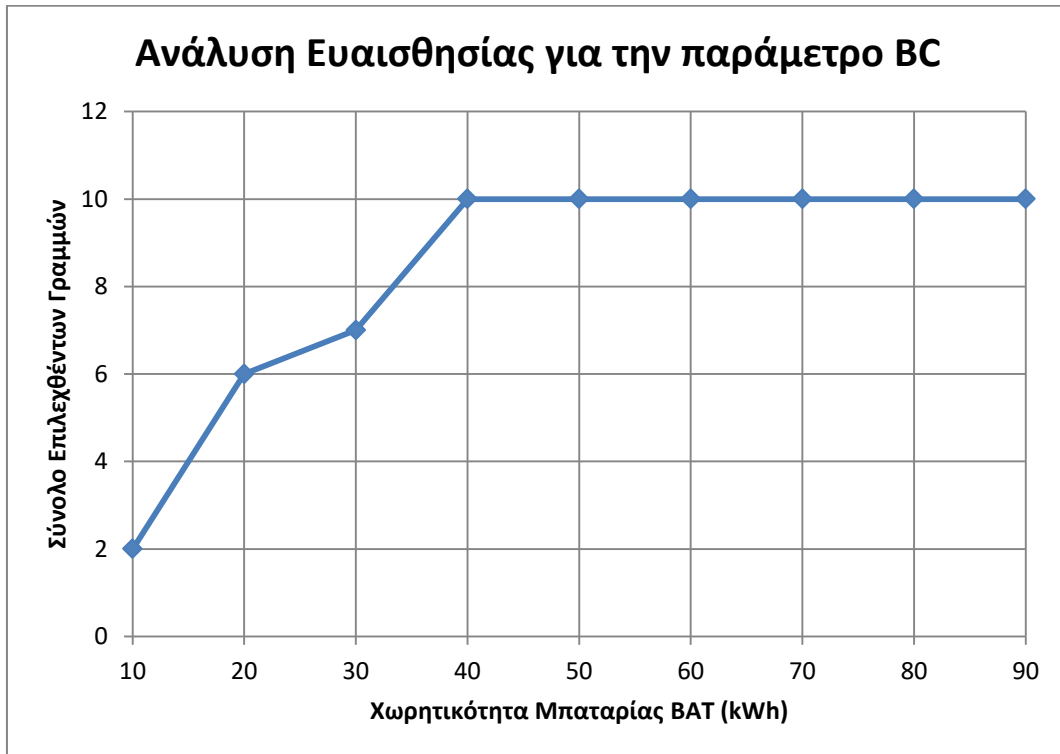
ii. Χωρητικότητα Μπαταρίας BC

Για την ανάλυση ευαισθησίας του μαθηματικού μοντέλου μεταβάλλοντας την παράμετρο BC χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 και 90 kWh, με αρχική την τιμή 60 kWh.

Πίνακας 16: Ανάλυση Ευαισθησία για την παράμετρο BC

Χωρητικότητα Μπαταρίας BC (kWh)	Επιλεχθείσες Λεωφορειακές Γραμμές	Σύνολο Επιλεχθέντων Γραμμών
10	0, 6	2
20	0, 2, 5, 14, 15, 18	6
30	0, 2, 5, 14, 15, 18, 30	7

40	0, 2, 5, 14, 15, 18, 20, 22, 25, 30	10
50	0, 2, 5, 14, 15, 18, 20, 22, 25, 30	10
60 (Αρχική Τιμή)	0, 2, 5, 14, 15, 18, 20, 22, 25, 30	10
70	0, 2, 5, 14, 15, 18, 20, 22, 25, 30	10
80	0, 2, 5, 14, 15, 18, 20, 22, 25, 30	10
90	0, 2, 5, 14, 15, 18, 20, 22, 25, 30	10



Σχήμα 29: Ανάλυση Ευαισθησία για την παράμετρο BC

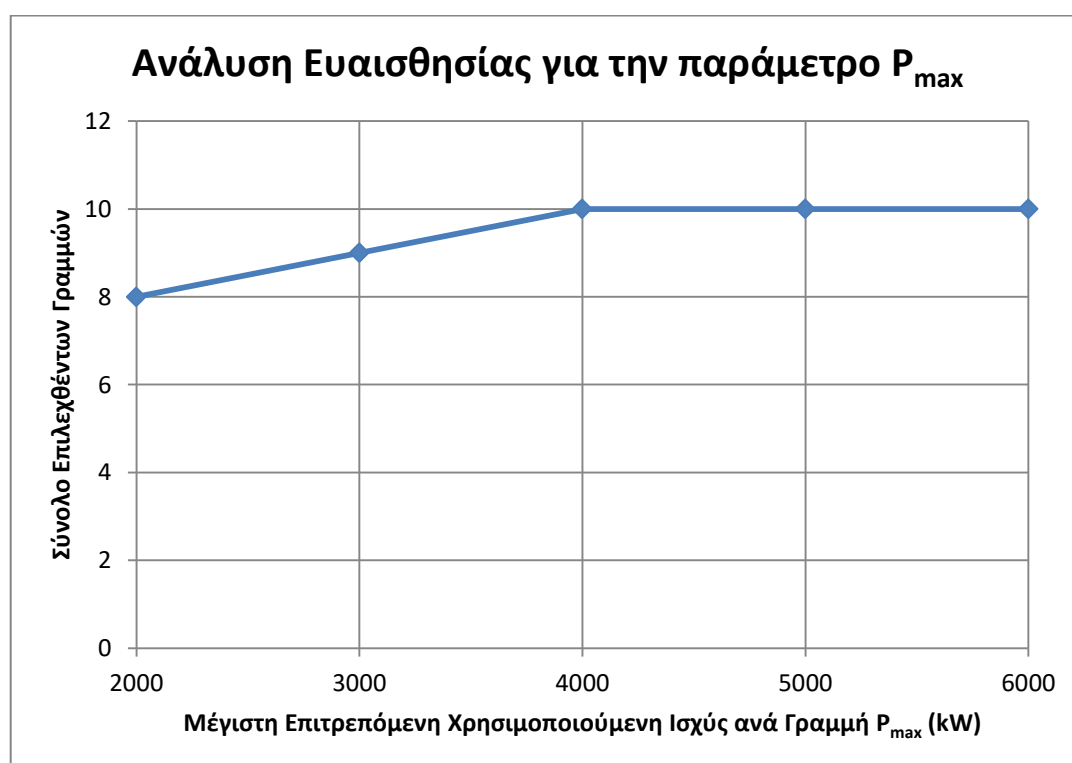
Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι με την αύξηση του μεγέθους της μπαταρίας αυξάνεται και ο αριθμός των επιλεχθέντων γραμμών, με τις τιμές από 40 έως και 90 kWh όμως να μην μεταβάλλουν τη λύση. Αυτό δείχνει ότι η μεταβολή της παραμέτρου BC δεν επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα και μάλιστα από το παραπάνω διάγραμμα γίνεται φανερό ότι σαν αρχική τιμή της παραμέτρου θα μπορούσε να ληφθεί η τιμή 40 ή 50 αντί για την τιμή 60 kWh. Η επιλογή αυτή όμως έγινε επειδή αποτελεί μια μέση τιμή των μεγεθών που χρησιμοποιούνται συνήθως. Συγκεκριμένα, πρόσφατες έρευνες έχουν δείξει ότι η χωρητικότητα της μπαταρίας επιλέγεται να κυμαίνεται μεταξύ 20kWh και 100kWh [Bartłomiejczyk (2017)], [Bartłomiejczyk et al. (2013)].

iii. **Μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή χρησιμοποιούμενης ισχύος ανά γραμμή P_{max}**

Για την ανάλυση ευαισθησίας του μαθηματικού μοντέλου μεταβάλλοντας την παράμετρο P_{max} χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές 2000, 3000, 4000, 5000 και 6000 kW, με αρχική την τιμή 4000 kW.

Πίνακας 17: Ανάλυση Ευαισθησίας για την παράμετρο P_{max}

Μέγιστη χρησιμοποιούμενη ισχύς ανά γραμμή P_{max} (kW)	Επιλεγθείσες Λεωφορειακές Γραμμές	Σύνολο Επιλεγθέντων Γραμμών
2000	0, 5, 14, 15, 18, 20, 22, 25	8
3000	0, 2, 5, 14, 15, 18, 20, 22, 25	9
4000 (Αρχική Τιμή)	0, 2, 5, 14, 15, 18, 20, 22, 25, 30	10
5000	0, 2, 5, 14, 15, 18, 20, 22, 25, 30	10
6000	0, 2, 5, 14, 15, 18, 20, 22, 25, 30	10



Σχήμα 30: Ανάλυση Ευαισθησίας για την παράμετρο P_{max}

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι με την αύξηση της μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής χρησιμοποιούμενης ισχύος αυξάνεται και ο αριθμός των

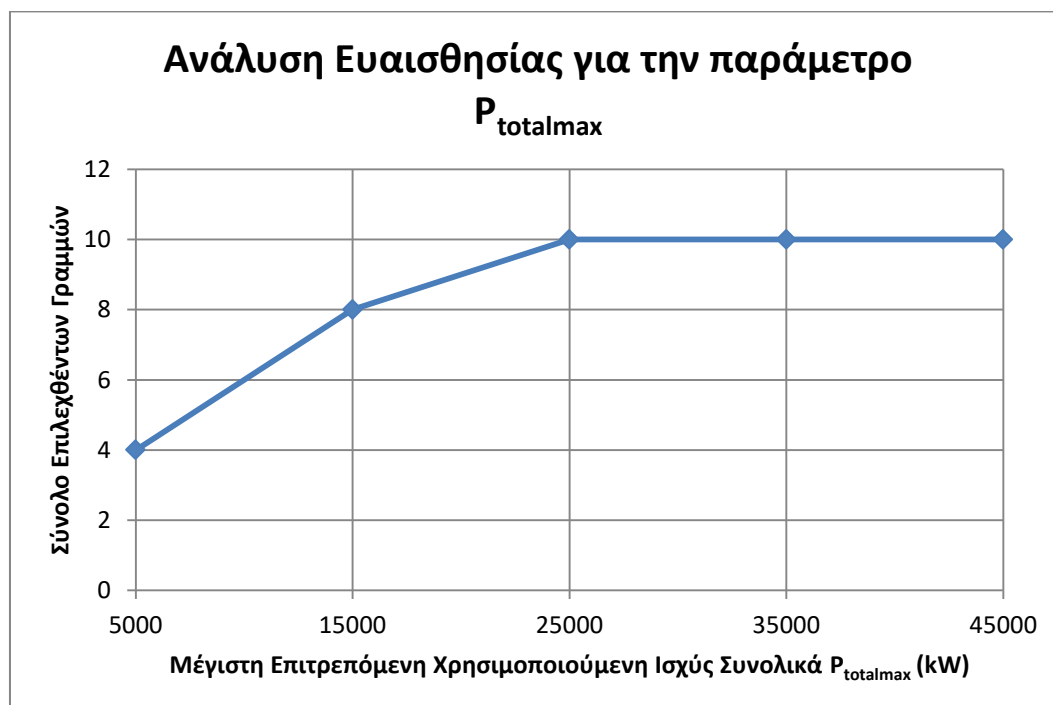
επιλεχθέντων γραμμών, με τις τιμές από 4000 έως και 6000 kW όμως να μην μεταβάλλουν τη λύση. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το ότι το σύνολο των επιλεχθέντων γραμμών μεταβάλλεται μόλις κατά μία, δείχνει ότι η μεταβολή της παραμέτρου P_{\max} δεν τροποποιεί σημαντικά το αποτέλεσμα.

iv. **Μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή χρησιμοποιούμενης ισχύος συνολικά P_{totalmax}**

Για την ανάλυση ευαισθησίας του μαθηματικού μοντέλου μεταβάλλοντας την παράμετρο P_{totalmax} χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές 5000, 15000, 25000, 35000 και 45000 kW, με αρχική την τιμή 25000 kW.

Πίνακας 18: Ανάλυση Ευαισθησίας για την Παράμετρο P_{totalmax}

Μέγιστη χρησιμοποιούμενη ισχύς συνολικά P_{totalmax} (kW)	Επιλεχθείσες Λεωφορειακές Γραμμές	Σύνολο Επιλεχθέντων Γραμμών
45000	0, 2, 5, 14, 15, 18, 20, 22, 25, 30	10
35000	0, 2, 5, 14, 15, 18, 20, 22, 25, 30	10
25000 (Αρχική Τιμή)	0, 2, 5, 14, 15, 18, 20, 22, 25, 30	10
15000	2, 5, 14, 18, 20, 22, 25	8
5000	15, 20, 22, 25	4



Σχήμα 31: Ανάλυση Ευαισθησίας για την Παράμετρο P_{totalmax}

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι με την αύξηση της συνολικής μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής χρησιμοποιούμενης ισχύος αυξάνεται και ο αριθμός των επιλεχθέντων γραμμών, με τις τιμές από 25000 έως και 45000 kW όμως, να μην μεταβάλλουν τη λύση. Η μεταβολή ωστόσο που συμβαίνει μεταξύ των τιμών 5000 και 25000 είναι αρκετά μεγάλη, επομένως εξάγεται το συμπέρασμα ότι η μεταβολή της παραμέτρου $P_{totalmax}$ επηρεάζει το αποτέλεσμα.

5.4 Σύνοψη

Συνοψίζοντας, στο παρόν κεφάλαιο έγινε η παρουσίαση και η ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν έπειτα της εφαρμογής του αλγορίθμου στο δίκτυο της Αθήνας. Αρχικά, διατηρώντας σταθερές τις τιμές των παραμέτρων και ίσες με εκείνες που παρουσιάστηκαν στο υπό κεφάλαιο 4.2, εφαρμόστηκε το μοντέλο για τρία πιθανά σενάρια, τα οποία προέκυψαν από τη μεταβολή των βαρών στην αντικειμενική συνάρτηση. Το Σενάριο 0, αποτέλεσε το βασικό σενάριο, δόθηκε δηλαδή, ίσο βάρος και στις δύο παραμέτρους της αντικειμενικής συνάρτησης ενώ, τα άλλα δύο έδωσαν προτεραιότητα σε μία εκ των δύο παραμέτρων. Συγκεκριμένα, στο Σενάριο 1 δόθηκε σημαντική βαρύτητα στην πρώτη παράμετρο της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία αφορά τη μεγιστοποίηση των εκπομπών CO₂ που εξοικονομούνται μέσω της αντικατάστασης των ντιζελοκίνητων λεωφορείων από τα νέα τρόλεϊ και λιγότερη στο συνολικό κόστος επένδυσης στα νέα τρόλεϊ. Ενώ, στο Σενάριο 2 δόθηκε σημαντική βαρύτητα στην δεύτερη παράμετρο της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία αφορά την ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης και λιγότερη στην εξοικονόμηση εκπομπών CO₂. Τα αποτελέσματα των τριών αυτών σεναρίων έδειξαν ότι τα αποτελέσματα του αλγορίθμου είναι λογικά. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση ευαισθησίας, στην οποία κάνοντας διάφορες μεταβολές στις τιμές των παραμέτρων εξήχθησαν αποτελέσματα. Αυτό έγινε με σκοπό να διερευνηθεί ο βαθμός στον οποίο επιδρούν οι παράμετροι στο τελικό αποτέλεσμα. Οι παράμετροι που μεταβλήθηκαν ήταν οι εξής:

- Το ελάχιστο αποδεκτό ποσοστό κάλυψης της γραμμής από εναέρια καλώδια (Y_{min}),
- Η Χωρητικότητα της μπαταρίας του BAT (BC),
- Η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή χρησιμοποιούμενης ισχύος ανά γραμμή (P_{max}) και
- Η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή χρησιμοποιούμενης ισχύος συνολικά ($P_{totalmax}$).

Από τα αποτελέσματα εξήχθη το συμπέρασμα ότι με τη μεταβολή και των τεσσάρων παραμέτρων ο αλγόριθμος μεταβάλλει το αποτέλεσμά του, ιδιαίτερα όμως με την μεταβολή του ελάχιστου αποδεκτού ποσοστού κάλυψης Y_{min} και λιγότερο με το μέγεθος της μπαταρίας BC.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται αρχικά, μια συνοπτική ανασκόπηση των στόχων, του προτύπου επίλυσης που αναπτύχθηκε αλλά και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή του αλγορίθμου. Έπειτα, διατυπώνονται ορισμένα συμπεράσματα με το πέρας της μελέτης και τέλος δίνονται ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα και μελλοντική εξέλιξη της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

6.2 Ανασκόπηση του Προβλήματος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αντιμετωπίστηκε το γνωστό πρόβλημα «Σχεδιασμός Δικτύου Διαδρομών Αστικών Συγκοινωνιών» (Transit Route Network Design Problem – TRNDP) με τη μέθοδο της επιλογής των ιδανικών λεωφορειακών γραμμών να αντικατασταθούν τα οχήματα που τις διατρέχουν από ηλεκτρικά και συγκεκριμένα από τα καινοτόμα τρόλεϊ με μπαταρία (BATs). Ο σχεδιασμός έγινε με γνώμονα την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος που επιφέρει η αστική συγκοινωνία. Συγκεκριμένα, στόχοι αποτέλεσαν η μεγιστοποίηση της μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που απελευθερώνουν τα υπάρχοντα ντιζελοκίνητα λεωφορεία και η ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης στα νέα τρόλεϊ.

Αρχικά, έγινε μια εκτενής περιγραφή στα περισσότερα από τα άρθρα της βιβλιογραφίας που υφίσταται μέχρι σήμερα και που αφορά το πρόβλημα Σχεδιασμού Δικτύου Διαδρομών Αστικών Συγκοινωνιών (TRNDP). Έπειτα, παρουσιάστηκαν το θεωρητικό υπόβαθρο και πληροφορίες για τα καινοτόμα τρόλεϊ με μπαταρία (BAT) αλλά και για το αποδοτικό σύστημα φόρτισης IMC – φόρτιση εν κινήσει.

Η μελέτη οδήγησε, σταδιακά, στη διαμόρφωση ενός μαθηματικού μοντέλου επίλυσης του υπό εξέταση προβλήματος το οποίο εφαρμόστηκε στο δίκτυο της πόλης της Αθήνας προκειμένου να εξεταστεί η αποδοτικότητά του. Η εφαρμογή έγινε για τρία διαφορετικά σενάρια με τα εξαγόμενα αποτελέσματα να είναι απολύτως λογικά. Για το βασικό σενάριο πραγματοποιήθηκε και ανάλυση ευαισθησίας για τις διάφορες παραμέτρους προκειμένου να εξετασθεί ο βαθμός επιρροής αυτών στο τελικό αποτέλεσμα.

Έτσι, έπειτα από την επιτυχημένη εφαρμογή του αλγορίθμου, εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι λύσεις που αποδίδονται είναι αποδεκτές και καλύπτουν πλήρως

και τους δύο στόχους της αντικειμενικής συνάρτησης ικανοποιώντας ταυτόχρονα όλους τους περιορισμούς.

6.3 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστίασε στον, περιβαλλοντικά φιλικό, σχεδιασμό ενός δικτύου διαδρομών για τα νέα τρόλεϊ με μπαταρία (BAT) μέσω επιλογής από τις υπάρχουσες λεωφορειακές γραμμές. Για τον σκοπό αυτό, διαμορφώθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο επίλυσης του προβλήματος, το οποίο, στη συνέχεια, εφαρμόστηκε στο δίκτυο της πόλης της Αθήνας. Τα αποτελέσματα φανερώνουν ότι το μοντέλο επιλέγει λογικές γραμμές ενώ, η ανάλυση ευαισθησίας έδειξε ότι οι μεταβολές σε διάφορες παραμέτρους επιφέρουν διαφορετικά αποτελέσματα με έναν λογικό και συστηματικό τρόπο. Το μαθηματικό μοντέλο, με σταθερές τις αρχικές τιμές των παραμέτρων, επιλύθηκε για τρία διαφορετικά σενάρια. Το σενάριο 0 ήταν το βασικό σενάριο το οποίο έδινε ίση βαρύτητα στο περιβαλλοντικό αλλά και στο επενδυτικό κόστος. Το σενάριο 1 έδινε έμφαση στο περιβαλλοντικό κόστος και συγκεκριμένα επέλεξε τις βέλτιστες, εκείνες, γραμμές με σκοπό τη μεγιστοποίηση του περιβαλλοντικού κόστους που εξοικονομείται από την αντικατάσταση των diesel λεωφορείων και την απαλλαγή από το διοξείδιο του άνθρακα που εκπέμπουν. Τέλος, το σενάριο 2 δίνοντας έμφαση στο επενδυτικό κόστος επέλεξε τις λιγότερες γραμμές που επέτρεπαν οι περιορισμοί και μάλιστα εκείνες που εμφάνιζαν το χαμηλότερο κόστος.

Η απλότητα του μαθηματικού μοντέλου σε συνδυασμό με την προσαρμοστικότητά του, επιτρέπει τη δοκιμή αρκετών σεναρίων για τον πειραματισμό και την εύρεση βέλτιστων λύσεων σε λεωφορειακά δίκτυα ακόμα και άλλων πόλεων. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν το μοντέλο αρκετά ελκυστικό στον τομέα των μεταφορών για μελέτη και περαιτέρω αναλύσεις.

6.4 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Όπως όλες οι μελέτες, έτσι και η συγκεκριμένη δεν μπορεί να καλύψει όλους τους πιθανούς στόχους και να συμπεριλάβει όλες τις παραμέτρους που θα μπορούσαν να εισαχθούν. Για το λόγο αυτό, δημιουργείται το παρόν κεφάλαιο ώστε να δοθούν μερικές προτάσεις για μελλοντική έρευνα και εξέλιξη της λύσης του προβλήματος.

Όσον αφορά την παραλλαγή του παρόντος προβλήματος, θα μπορούσε να δημιουργηθεί ένας αλγόριθμος ο οποίος, αντί να υποδεικνύει τις γραμμές εκείνες που θεωρούνται οι βέλτιστες για να αντικατασταθούν, να βρίσκει και τον βέλτιστο

αριθμό οχημάτων ΒΑΤ που χρειάζεται να αγοραστούν για τη λειτουργία των επιλεγμένων γραμμών, διατηρώντας τους ίδιους στόχους, δηλαδή μεγιστοποίηση του περιβαλλοντικού κόστους που εξοικονομείται και ελαχιστοποίηση του επενδυτικού κόστους.

Θα μπορούσε, επίσης, αντί να ληφθεί μια μέση τιμή για την κατανάλωση ενέργειας του ΒΑΤ, να υπολογίζεται, ανάλογα με διάφορες παραμέτρους όπως με τις κλίσεις του εδάφους των διαδρομών, με τη μάζα του οχήματος η οποία μεταβάλλεται με τον αριθμό των επιβατών, με τις καιρικές συνθήκες κ.α.

Στο παρόν πρόβλημα δεν εισήχθη καθόλου η έννοια της ζήτησης η οποία λόγω του ότι λαμβάνεται ένα υπάρχον δίκτυο θεωρείται ότι έχει συμπεριληφθεί κατά το σχεδιασμό αυτού. Επειδή όμως αυτό είναι ένα δεδομένο που μεταβάλλεται με την πάροδο των ετών και ταυτόχρονα οι διαδρομές παραμένουν σταθερές, θα μπορούσε να εισαχθεί και η παράμετρος της ζήτησης. Δηλαδή να επιδιώκεται να επιλεγεί μια γραμμή η οποία εκτός των άλλων, θα εξυπηρετεί και περισσότερους επιβάτες.

Τέλος, όσον αφορά την επέκταση του προβλήματος θα μπορούσε αντί να επιλέγει διαδρομές, να δημιουργεί διαδρομές, ώστε να χρησιμοποιεί το μικρότερο απαιτούμενο μήκος εναέριων καλωδίων και στην διαδρομή που θα διένυε αυτόνομα να επέλεγε τμήματα με τη χαμηλότερη τιμή κατανάλωσης ενέργειας. Έτσι, θα μπορούσε να συμπεριληφθεί και η έννοια του “eco – routing”.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Dobroslav Grygara, Michal Kohánia, Rastislav Štefún, Peter Drgoňab. Analysis of limiting factors of battery assisted trolleybuses. *Transportation Research Procedia* 40 (2019) 229–235.
2. Mikołaj Bartłomiejczyk and Marcin Połom. Dynamic charging of electric buses as a way to reduce investment risks of urban transport system electrification. 2019.
3. Mikołaj Bartłomiejczyk. Practical application of In Motion Charging: trolleybuses service on bus lines. 2017.
4. Kannan Viswanath and Srinivas Peeta. The Multicommodity Maximal Covering Network Design Problem for Planning Critical Routes for Earthquake Response. 2002.
5. A. Mpousdra, C. Iliopoulou, K. Kepaptsoglou, E. Vlahogianni, Y. Tyrinopoulos. Rapid transit network design for on-line electric vehicles. 2018.
6. Kevin M. Curtin, Steve Biba. The Transit Route Arc-Node Service Maximization problem. *European Journal of Operational Research* 208 (2011) 46–56.
7. Christina Iliopoulou, Konstantinos Kepaptsoglou. Integrated transit route network design and infrastructure planning for on-line electric vehicles. *Transportation Research Part D* 77 (2019) 178–197.
8. Gaetano Fuscoa, Adriano Alessandrini, Chiara Colombaroni, Maria Pia Valentini. A model for transit design with choice of electric charging system. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 87 (2013) 234 – 249.
9. Chengwei Zhang, Ji Tao, Yu Cheng. Research on Optimal Electrification Selection and Sequence Scheme Model of City's Bus Routes. 2017.
10. Konstantinos Kepaptsoglou and Matthew Karlaftis. Transit Route Network Design Problem: Review. 2009.
11. Myeonghyeon Kim, Seung-Young Kho and Dong-Kyu Kim. A Transit Route Network Design Problem Considering Equity. 2019
12. Avishai Ceder, Nigel H.M.Wilson. Bus network design. *Transportation Research Part B: Methodological*. Volume 20, Issue 4, August 1986, Pages 331-344.
13. Giuseppe Bruno, Gianpaolo Ghiani, Gennaro Improta. A multi-modal approach to the location of a rapid transit line. *European Journal of Operational Research* 104 (1998) 321 332.
14. Giuseppe Bruno, Michel Gendreau, Gilbert Laporte. A heuristic for the location of a rapid transit line. *Computers & Operations Research* 29 (2002) 1 – 12.
15. Partha Chakroborty. Genetic Algorithms for Optimal Urban Transit Network Design. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Volume 18, Issue 3, p. 184-200.
16. G. Laporte, J.A. Mesa, F.A. Ortega, F. Perea. Planning rapid transit networks. *Socio-Economic Planning Sciences* 45 (2011) 95-104.
17. Καρλαύτης και Σταθόπουλος. Βιβλίο: Σχεδιασμός Μεταφορικών Συστημάτων. 2016.
18. Andrés E. Díez and Mauricio Restrepo. A Planning Method for Partially Grid-Connected Bus Rapid Transit Systems Operating with In-Motion Charging Batteries. 2021.
19. Feng Mao, Zhiheng Li, Kai Zhang. Carbon dioxide emissions estimation of conventional diesel buses electrification: A well-to-well analysis in Shenzhen, China. 2020.

Παράρτημα: Κώδικας

```
import pulp as pl

#PARAMETERS

PowerDemand = 30 #kW/km

ECaverageBAT = 2.5 #kWh/km

VmBAT = 12 #km/h

Cinv = 10**6 #euros/veh

emi = 1.19 #kg/km

Cem = 0.057 #euros/kg

headway = 0.1 #h

Ymin = 0.2 #%

Pmax = 4000 #kW

Ptotalmax = 25000 #kW

BC = 60 #kWh

SoCmax = 0.8 # %

a = 1

b = 1

Nroutes = 32

Routes=[k for k in range(Nroutes)]
```

```
length = [4.015, 9.99, 13.125, 6.95, 27.91, 7.73, 4.805, 16.915, 9.79, 10.21, 9.345, 20.99,
11.905, 13.95, 9.01, 6.08, 10.495, 7.3, 9.86, 10.2, 13.74, 10.165, 15.1, 14.77, 17.08, 13.22,
18.155, 9.705, 11.87, 17.65, 14.555, 14.025]
```

```
Yi = [0.82316, 0.37688, 0.53410, 0.18993, 0.09835, 0.41915, 0.48179, 0.07656, 0.38304,
0.39863, 0.34350, 0.57027, 0.34901, 0.36416, 0.39789, 0.38816, 0.44021, 0.27329, 0.48174,
0.42794, 0.25946, 0.62223, 0.21589, 0.51151, 0.23126, 0.23714, 0.32525, 0.31376, 0.68155,
0.41076, 0.55582, 0.46453]
```

```
fiBAT = [12, 9, 13, 10, 10, 12, 9, 10, 9, 9, 9, 9, 10, 10, 13, 13, 8, 10, 12, 10, 12, 9, 13, 10, 10,
12, 9, 10, 9, 9, 13, 8]
```

```
fitr = [20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20,
20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20]
```

```
poweri = [3305, 3765, 7010, 1320, 2745, 3240, 2315, 1295, 3750, 4070, 3210, 11970, 4155,
5080, 3585, 2360, 4620, 1995, 4750, 4365, 3565, 6325, 3260, 7555, 3950, 3135, 5905, 3045,
8090, 7250, 8090, 6515]
```

```
ticycle = list()
```

```
for i in range(len(length)):
```

```
    ticycle.append(2 * length[i] / VmBAT)
```

```
piBAT = list()
```

```
for i in range(len(poweri)):
```

```
    piBAT.append(poweri[i] - (fitr[i] * PowerDemand * Yi[i] * length[i]))
```

```
ti = list()
```

```
for i in range(len(Yi)):
```

```
    ti.append(Yi[i] * length[i] / VmBAT)
```

```
ObjFun1 = list()
```

```
for i in range(len(Yi)):
```

```
    ObjFun1.append(length[i] * fiBAT[i] * emi * Cem)
```

```

min1 = min(ObjFun1)
max1 = max(ObjFun1)

NormObjFun1 = list()
for i in range(len(Yi)):
    NormObjFun1.append(((ObjFun1[i] - min1) / (max1 - min1))*(200 - 100) + 100)

ObjFun2 = list()
for i in range(len(Yi)):
    ObjFun2.append((ticycle[i] / headway) * Cinv)

min2 = min(ObjFun2)
max2 = max(ObjFun2)

NormObjFun2 = list()
for i in range(len(Yi)):
    NormObjFun2.append(((ObjFun2[i] - min2) / (max2 - min2))*(200 - 100) + 100)

#THE PROBLEM VARIABLE
prob = pl.LpProblem("Trolleybuses_Route_Selection", pl.LpMaximize)

#DECISION VARIABLE
#Xi = 1 αν επιλέγεται η γραμμή i να διέρχεται BAT αντί για λεωφορείο diesel, αλλιώς 0
X = pl.LpVariable.dicts('X_%s',(Routes),lowBound = 0, upBound = 1, cat = 'Binary')

#OBJECTIVE FUNCTION
prob +=(pl.lpSum(a * X[i] * NormObjFun1[i] for i in Routes)) - (pl.lpSum(b * X[i] *
NormObjFun2[i] for i in Routes))

```

```

#CONSTRAINTS

#No.1
for i in Routes:
    prob += X[i] <= (Yi[i] / Ymin)

#No.2
for i in Routes:
    prob += X[i] <= ((piBAT[i]*ti[i]) / (2*((1-Yi[i])*length[i])*ECaverageBAT))

#No.3
for i in Routes:
    prob += X[i] <= (Pmax / piBAT[i])

#No.4
prob += (pl.lpSum([X[i]*piBAT[i] for i in Routes])) <= Ptotalmax

#No.5
for i in Routes:
    prob += X[i] <= ((BC*SoCmax) / ((1-Yi[i])*length[i])*ECaverageBAT))

#No.6
prob += pl.lpSum([X[i] for i in Routes]) >= 2

prob.solve()

print('Status:',pl.LpStatus[prob.status])

for v in prob.variables():
    print(v.name , '=', v.varValue)

```