



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών –
Μηχανικών Γεωπληροφορικής

Τομέας Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης

Εργαστήριο Συγκοινωνιακής Τεχνικής



ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ
ΣΤΑΘΜΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΛΕΩΦΟΡΕΙΩΝ

Διπλωματική Εργασία



ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ ΤΖΑΜΑΚΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2021

Επιβλέπων: Δρ. Κωνσταντίνος Κεραπτσόγλου, Αναπληρωτής Καθηγητής



National Technical University of Athens

School of Rural, Surveying & Geoinformatics
Engineering

Department of Infrastructure and Rural Planning

Laboratory of Transportation



DEVELOPMENT OF A LOCATION OPTIMIZATION
MODEL OF ELECTRIC BUS CHARGING STATIONS

Diploma Thesis



DIONYSIOS TZAMAKOS

ATHENS, JUNE 2021

Supervisor: Dr. Konstantinos Kepaptsoglou, Associate Professor

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 να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κ. Κεραπτσόγλου Κωνσταντίνο, για την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερος ενδιαφέρον και επίκαιρο θέμα, για το ενδιαφέρον του, και την καταλυτική επιστημονική του καθοδήγηση για την διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

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 καθοδήγηση σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου, τους φίλους μου και ιδιαίτερος το Νικόλα, για την συμπαράσταση και την υπομονή που έδειξαν τόσο στην διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας, όσο και στην διάρκεια των δημιουργικών χρόνων των σπουδών μου.

«Το μυαλό δεν είναι ένα δοχείο που πρέπει να γεμίσει, αλλά μια φωτιά που πρέπει ν' ανάψει». Πλούταρχος, 45 - 120 μ.Χ.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η χωροθέτηση φορτιστών σε συγκεκριμένο δίκτυο αστικών συγκοινωνιών για την φόρτιση των ηλεκτρικών λεωφορείων, υπό περιορισμένο χρόνο αναμονής στις τερματικές στάσεις του δικτύου. Αφορμή αποτελεί η μετάβαση σε ένα δίκτυο μεταφορών πιο φιλικό προς το περιβάλλον αλλά και τον χρήστη, αποδοτικότερο και λειτουργικά οικονομικότερο, σε σύγκριση με ένα τυπικό δίκτυο μεταφορών με λεωφορεία ντίζελ, η οποία εξετάζεται όλο και πιο έντονα από την διεθνή επιστημονική κοινότητα. Το πρόβλημα αυτό αποτελεί ένα πρόβλημα χωροθέτησης εγκαταστάσεων και ανήκει στην κατηγορία των Προβλημάτων Κάλυψης Κορυφών (Vertex Covering Problems). Πραγματοποιείται η εγκατάσταση φορτιστών διαφορετικών ισχύων μέσω της ανάπτυξης ενός μοντέλου βελτιστοποίησης – ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού – ως προς το κόστος της επένδυσης αυτής, προκειμένου να χωροθετηθεί ο ελάχιστος απαιτούμενος αριθμός φορτιστών για την εξυπηρέτηση του δικτύου. Ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο ουρών αναμονής, το μοντέλο M/M/1, αξιοποιείται για τον υπολογισμό των χρόνων αναμονής στις τερματικές στάσεις. Το αναπτυχθέν μοντέλο εφαρμόζεται σε τεχνητό δίκτυο αναφοράς αστικών συγκοινωνιών από την βιβλιογραφία, και αξιολογείται η ορθότητα του και η ευαισθησία του μέσα από διάφορες αναλύσεις που πραγματοποιούνται.

Λέξεις – φράσεις κλειδιά: ηλεκτρικά λεωφορεία, υποδομή φόρτισης ηλεκτρικών λεωφορείων, χρόνος αναμονής, πρόβλημα βελτιστοποίησης, χωροθέτησης σταθμών φόρτισης, πρόβλημα κάλυψης κορυφών, πρόβλημα χωροθέτησης εγκαταστάσεων.

Abstract

Objective of this thesis is the placement of fast chargers in a specific network of public transport for the charging of the electric buses, under a limited waiting time at the terminals of the network. The reason is the transition to a transport network that is not only more environmentally friendly, but also user friendly, more efficient, and operationally cheaper, compared to a typical transport network with diesel buses. The above issue, besides, is increasingly being considered by the international scientific community. This problem is a facility location problem and belongs to the category of Vertex Covering Problems. Chargers of different powers are being installed, through the development of an optimization problem – integer linear programming – in terms of the cost of this investment in order, to locate the minimum number of chargers required to service the network. A widely used queuing model, the M/M/1 model, is employed to estimate bus queuing times at terminal stops. The proposed model is applied to a benchmark artificial urban transport network from the literature, and its correctness and sensitivity are evaluated through various analyzes carried out.

Key words – phrases: battery electric bus (BEB), charging infrastructure for electric buses, waiting time, optimizing electric bus, placement of electric bus charging stations, vertex covering problem, facility location problems.

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή	16
1.1: Ο Στόχος της Εργασίας	18
1.2: Η Δομή της Εργασίας.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο	20
2.1: Μεταφορές και Εκπομπές Co2.....	20
2.2: Τα Είδη των Ηλεκτρικών Λεωφορείων.....	23
2.3: Η Ένταξη του Ηλεκτρικού Λεωφορείου στις Μεταφορές	24
2.3.1: Οι Κατηγορίες Των Ηλεκτρικών Λεωφορείων.....	25
2.3.2: Τα Πλεονεκτήματα του Ηλεκτρικού Λεωφορείου	26
2.3.3: Τα Μειονεκτήματα και οι Προκλήσεις των Ηλεκτρικών Λεωφορείων	27
2.4: Η Πηγή Ενέργειας του Ηλεκτρικού Λεωφορείου	29
2.4.1: Η Παγκόσμια Αγορά στις Μπαταρίες Ιόντων – Λιθίου	30
2.4.2: Η Μπαταρία Ιόντων – Λιθίου και οι Τύποι Κυψελών	30
2.4.3: Ανάλυση και Εφαρμογή στα Ηλεκτρικά Λεωφορεία	31
2.4.4: Οι Μπαταρίες Στερεάς Κατάστασης	35
2.5: Οι Στρατηγικές Φόρτισης	37
2.5.1: Φόρτιση στο Αμαξοστάσιο (Depot Charging)	38
2.5.2: Φόρτιση στους Τερματικούς Σταθμούς & στο Αμαξοστάσιο	40
2.5.3: Φόρτιση στα Άκρα της Διαδρομής και στις Ενδιάμεσες Στάσεις.....	40
2.5.4: Η Στρατηγική της Ευκαιριακής Φόρτισης (Opportunity Charging Strategy).....	42
2.5.4.1: Φόρτιση στα Άκρα της Διαδρομής (End – Stop Charging).....	43
2.5.4.2: Φόρτιση Κατά Μήκος της Διαδρομής (Along the Route Charging)	43
2.6: Τεχνολογίες Φόρτισης Ηλεκτρικών Λεωφορείων.....	44
2.6.1: Αγωγή Φόρτιση.....	44
2.6.1.1: Τα Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Αγωγικής Φόρτισης	46
2.6.2: Η Επαγωγική Φόρτιση.....	47
2.6.2.1: Τα Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Επαγωγικής Φόρτισης	48
2.7: Ηλεκτροκίνηση και Ελλάδα	48
2.7.1: Μετάβαση σε ένα Πράσινο και Βιώσιμο Σύστημα Μεταφορών	49
2.7.2: Τα Ηλεκτρικά Λεωφορεία στην Αθήνα	49
2.7.2.1: Το BYD Midi Bus	49
2.7.2.2: Το BYD K9	50
2.7.2.3: Το Yutong U12	52
2.7.2.4: Το Solaris Urbino 12 Electric.....	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Το πρόβλημα Χωροθέτησης Εγκαταστάσεων (Facility Location Problem)...	56

3.1: Η Μεθοδολογική Προσέγγιση του Προβλήματος.....	57
3.2: Μοντέλα Χωροθέτησης.....	58
3.2.1: Τα Προβλήματα Κάλυψης στην Χωροθέτηση Εγκαταστάσεων.....	59
3.2.2: Το Πρόβλημα του Συνόλου Κάλυψης – The Set Covering Location Problem	60
3.2.3: Το Πρόβλημα της Μέγιστης Κάλυψης – The Maximal Covering Location Problem	61
3.2.4: Το Μοντέλο Κάλυψης Κορυφών – The Vertex Cover Problem.....	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Προηγούμενες Έρευνες	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Το Μαθηματικό Μοντέλο	70
5.1: Η Συλλογή των Δεδομένων	70
5.1.1: Το Δίκτυο Εφαρμογής του Μοντέλου	71
5.1.2: Οι Υποθέσεις του Μοντέλου	72
5.1.2: Η Λειτουργία της Λεωφορειακής Γραμμής.....	73
5.2: Η Μαθηματική Διαμόρφωση του Προβλήματος.....	74
5.3: Το Περιβάλλον Επίλυσης του Προβλήματος	81
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Τα Αποτελέσματα.....	82
6.1: Ανάλυση Ευαισθησίας των Παραμέτρων	85
6.1.1: Μεταβολή του Ποσοστού SOCmin	86
6.1.2: Μεταβολή του Ποσοστού SOCmin και της Χωρητικότητας Μπαταρίας BC.....	86
6.1.3: Μεταβολή της Χωρητικότητας Μπαταρίας BC	88
6.1.4: Μεταβολή του Ποσοστού SOCmax και της Χωρητικότητας Μπαταρίας BC	89
6.1.5: Μεταβολή του Ποσοστού SOCmax και της Ισχύος P_s των Φορτιστών στις Ενδιάμεσες Στάσεις.....	90
6.1.6: Μεταβολή της Ισχύος P_f των Φορτιστών στις Τερματικές Στάσεις.....	91
6.1.7: Μεταβολή της Ισχύος Φόρτισης P_f στις Τερματικές Στάσεις, της Χωρητικότητας της μπαταρίας BC, του Ποσοστού SOCmax και του εύρους τιμών της Ακέραιας Μεταβλητής Απόφασης Y_i	92
6.1.8: Μεταβολή της Συχνότητας f_i , R με την οποία φτάνουν τα Ηλεκτρικά Λεωφορεία στο Τέρμα της κάθε Γραμμής	93
6.1.9: Μεταβολή της Συχνότητας f_i , R με την οποία φτάνουν τα ηλεκτρικά λεωφορεία στο τέρμα της κάθε γραμμής και της Ισχύος Φόρτισης P_f στις Τερματικές Στάσεις.....	94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Επίλογος	96
7.1: Το Συμπέρασμα.....	96
7.2: Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	96
Βιβλιογραφία	99
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	101

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1: Ποσοστό συμμετοχής / τύπο οχήματος / χώρα Ε.Ε στις μεταφορές (2017)	20
Σχήμα 2: Ποσοστό συμμετοχής / τύπο οχήματος στην ρύπανση από CO ₂ (https://www.eea.europa.eu/)	21
Σχήμα 3: Εξέλιξη εκπομπών CO ₂ / οικονομικό τομέα περιόδου 1990 – 2016 (https://www.eea.europa.eu/)	22
Σχήμα 4: Καθοριστικά στοιχεία των διαφόρων τύπων ηλεκτρικών λεωφορείων (https://www.mrcagney.com/)	24
Σχήμα 5: Ηλεκτρικό λεωφορείο κατά την φόρτιση (1)	26
Σχήμα 6: Ηλεκτρικό λεωφορείο κατά την φόρτιση (2)	26
Σχήμα 7: Σύγκριση μεταξύ ΗΕΒ, FCEB και ΒΕΒ (https://www.giiresearch.com/)	28
Σχήμα 8: Πρόγνωση για την αγορά - τύπο ηλεκτρικών λεωφορείων έως το 2030 (https://www.matec-conferences.org/)	29
Σχήμα 9: Η εξέλιξη της αγοράς μπαταριών Li - ion / ανά ήπειρο (https://www.marketsandmarkets.com/)	30
Σχήμα 10: Η σύνθεση των τριών διαφορετικών τύπων κυψελών ιόντων – λιθίου (https://www.matec-conferences.org/)	31
Σχήμα 11: Παράμετροι τοποθετημένων μπαταριών διαφορετικών κυψελών (https://www.matec-conferences.org/)	33
Σχήμα 12: Παρουσίαση της παραμέτρου 'μάζα' συναρτήσει της 'αυτονομίας' (https://www.matec-conferences.org/)	33
Σχήμα 13: Μεταβολή μάζας ηλεκτρικού λεωφορείου συναρτήσει του αριθμού μπαταριών, ανά τύπο κυψελών (https://www.matec-conferences.org/)	34
Σχήμα 14: Η αυτονομία του ηλεκτρικού λεωφορείου συναρτήσει του αριθμού μπαταριών (https://www.matec-conferences.org/)	34
Σχήμα 15: Το eCitaroG της Mercedes Benz (1) (https://www.mercedes-benz-bus.com/).....	36
Σχήμα 16: Το eCitaroG της Mercedes Benz (2) (https://www.mercedes-benz-bus.com/).....	36
Σχήμα 17: Φόρτιση ηλεκτρικού λεωφορείου με παντογράφο (https://www.globalelectricity.org/).....	45
Σχήμα 18: Αγωγή φόρτιση ηλεκτρικού λεωφορείου με παντογράφο – 1 (https://new.abb.com/)	45
Σχήμα 19: Αγωγή φόρτιση ΒΕΒ με παντογράφο – 2 (https://www.linkedin.com/pulse/sustainable-public-transport)	46
Σχήμα 20: Αγωγή φόρτιση ΒΕΒ με παντογράφο – 3 (https://www.sustainable-bus.com/).....	46
Σχήμα 21: Πλεονεκτήματα της αγωγικής φόρτισης (https://twitter.com/siemensmobility/status)	46
Σχήμα 22: Επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικού λεωφορείου – 1 (https://www.urban-transport-magazine.com/).....	47
Σχήμα 23: Επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικού λεωφορείου – 2 (https://automotive-exports.com/)	48
Σχήμα 24: Το BYD Midi Bus – 1 (https://www.athenstransport.com/)	50
Σχήμα 25: Το BYD Midi Bus – 2 (https://www.athenstransport.com/)	50
Σχήμα 26: Το BYD K9 – 1 (https://www.athenstransport.com/)	51
Σχήμα 27: Το BYD K9 – 2 (https://www.athenstransport.com/)	51
Σχήμα 28: Το BYD K9 – 3 (https://www.athenstransport.com/)	52
Σχήμα 29: Το Yutong U12 – 1 (https://www.alamy.com/).....	52
Σχήμα 30: Το Yutong U12 – 2 (https://www.alamy.com/).....	53

Σχήμα 31: To Solaris Urbino 12 Electric – 1 (https://www.youtruck.gr/)	53
Σχήμα 32: To Solaris Urbino 12 Electric – 2 (https://www.youtruck.gr/)	54
Σχήμα 33: To Solaris Urbino 12 Electric – 3 (https://www.youtruck.gr/)	55
Σχήμα 34: Vertex Covering Problem (http://isaacsteele.com/)	65
Σχήμα 35: Minimum Vertex Covering Problem (http://isaacsteele.com/)	65
Σχήμα 36: Το τεχνητό δίκτυο αστικών συγκοινωνιών Mumford0 (https://users.cs.cf.ac.uk/)	71
Σχήμα 37: Το προγραμματιστικό περιβάλλον Spyder 3.8.....	81
Σχήμα 38: Απεικόνιση των στάσεων εγκατάστασης φορτιστή.....	84
Σχήμα 39: Διαγραμματική αναπαράσταση Σεναρίου 1.....	86
Σχήμα 40: Διαγραμματική αναπαράσταση Σεναρίου 2.....	87
Σχήμα 41: Διαγραμματική αναπαράσταση Σεναρίου 3.....	88
Σχήμα 42: Διαγραμματική παρουσίαση σεναρίων 5.1 και 6	92

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Σύνολα, παράμετροι και μεταβλητές απόφασης του μαθηματικού μοντέλου ...	74
Πίνακας 2: Συχνότητα των ηλεκτρικών λεωφορείων στις τερματικές στάσεις ανά γραμμή .	82
Πίνακας 3: Τα αποτελέσματα του μοντέλου βελτιστοποίησης	82
Πίνακας 4: Αριθμός και τύπος φορτιστών ανά στάση.....	83
Πίνακας 5: Χρόνος φόρτισης ηλεκτρικού λεωφορείου ανά στάση	83
Πίνακας 6: Αποτελέσματα σεναρίου 1	86
Πίνακας 7: Αποτελέσματα σεναρίου 2	87
Πίνακας 8: Αποτελέσματα σεναρίου 3	88
Πίνακας 9: Αποτελέσματα σεναρίου 4	89
Πίνακας 10: Αποτελέσματα σεναρίου 5.1	90
Πίνακας 11: Αποτελέσματα σεναρίου 5.2	91
Πίνακας 12: Αποτελέσματα σεναρίου 6	91
Πίνακας 13: Αποτελέσματα σεναρίου 7	92
Πίνακας 14: Οι νέες συχνότητες των ηλεκτρικών λεωφορείων ανά γραμμή.....	93
Πίνακας 15: Αποτελέσματα σεναρίου 8	94
Πίνακας 16: Αποτελέσματα σεναρίου 9	94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή

1.1: Ο Στόχος της Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ανάπτυξη ενός προτύπου βέλτιστης χωροθέτησης φορτιστών για στόλο ηλεκτρικών λεωφορείων τα οποία εξυπηρετούν ένα συγκεκριμένο δίκτυο αστικών συγκοινωνιών. Βάσει αυτού του θέματος εξετάζονται ερωτήματα όπως:

- ♦ Ποιες πτυχές του συγκεκριμένου ζητήματος πρέπει να αναλυθούν, ακολουθώντας ένα μεθοδολογικό πλαίσιο το οποίο θα χρησιμοποιείται για την αξιόπιστη και αποτελεσματική μελέτη των πιθανών τοποθεσιών εγκατάστασης σταθμών φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων.
- ♦ Ποια είναι η βέλτιστη λύση όσον αφορά τις τοποθεσίες εγκατάστασης σταθμών φόρτισης για τον στόλο ηλεκτρικών λεωφορείων τα οποία θα εξυπηρετούν ένα συγκεκριμένο δίκτυο.
- ♦ Ποια υποδομή φόρτισης είναι πιο αποδοτική βάσει χαρακτηριστικών της κάθε τοποθεσίας, διαθέσιμων τεχνολογιών και επίδρασης στην καθημερινή λειτουργία των ηλεκτρικών λεωφορείων.

Η εργασία αυτή, επομένως, έχει ως στόχο την ανάπτυξη ενός κατάλληλου μεθοδολογικού πλαισίου, λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις απαραίτητες παραμέτρους που επηρεάζουν την επιλογή της βέλτιστης λύσης στο ζήτημα της χωροθέτησης φορτιστών ηλεκτρικών λεωφορείων σε συγκεκριμένο δίκτυο αστικής συγκοινωνίας, υπό τον περιορισμό του χρόνου αναμονής στις τερματικές στάσεις.

1.2: Η Δομή της Εργασίας

Η εργασία αποτελείται από 7 κεφάλαια. Συγκεκριμένα:

- Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στο θέμα που θα αναλυθεί, στα ερωτήματα που δημιουργούνται και εξετάζονται και στον προς επίτευξη στόχο της εργασίας.
- Στο 2^ο κεφάλαιο παρέχονται πληροφορίες που αφορούν το κομμάτι της ηλεκτροκίνησης στον κόσμο των μετακινήσεων, το πως η τεχνολογία αυτή άρχισε να γίνεται το επίκεντρο όσον αφορά το μέλλον των μετακινήσεων, την πηγή ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων και δει των ηλεκτρικών λεωφορείων, τις διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης αυτών που κυριαρχούν σήμερα, τις τεχνολογίες φόρτισης καθώς, και που βρίσκεται η Ελλάδα όσον αφορά την υιοθέτηση αυτής της τεχνολογίας στον στόλο αστικών λεωφορείων.
- Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται το γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στην συγκεκριμένη εργασία. Γίνεται μία ανάλυση της έννοιας της χωροθέτησης εγκαταστάσεων και αναλύονται δύο βασικά μοντέλα χωροθέτησης, τα

οποία προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό και το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί για την εύρεση της βέλτιστης λύσης στο ζήτημα της χωροθέτησης σταθμών φόρτισης.

- Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η σχετική βιβλιογραφία και οι μελέτες που διεξήχθησαν από άλλους ερευνητές, οι οποίες αναλύουν παρόμοια θέματα και παρέχουν μία πιο αναλυτική εικόνα όσον αφορά την αντιμετώπιση αυτών.
- Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε, τα δεδομένα που συλλέχθηκαν, οι υποθέσεις που πραγματοποιήθηκαν, οι τιμές των διάφορων παραμέτρων και οι περιορισμοί, τα οποία συμπληρώνουν το μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε. Επιπλέον, γίνεται η ανάλυση διαφορετικών σεναρίων, η διασφάλιση της σωστής λειτουργίας του μοντέλου και ο τρόπος με τον οποίο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα.
- Στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, ο σχολιασμός αυτών και η πραγματοποίηση της ανάλυσης διαφορετικών σεναρίων.
- Στο 7^ο κεφάλαιο γίνεται μία κατακλείδα ανακεφαλαιώνοντας τα αποτελέσματα από την συγκεκριμένη μελέτη, η οποία ακολουθείται από προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

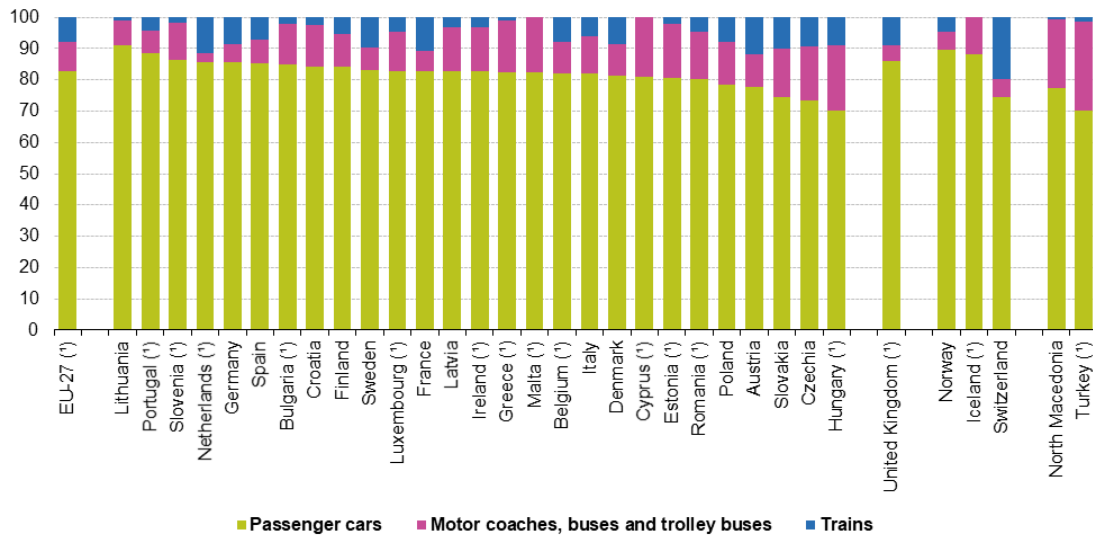
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1: Μεταφορές και Εκπομπές Co2

Τον τελευταίο αιώνα παρατηρείται μία 'συρρίκνωση' του πλανήτη καθώς, οι σταδιακά αυξανόμενες ανάγκες του πληθυσμού έχουν οδηγήσει στην όλο και πιο γρήγορη ανάπτυξη των μεταφορών. Η εξάρτηση του πληθυσμού από τον τομέα των μεταφορών δεν αντικατοπτρίζεται μόνο από την εξέλιξη των διεθνών μεταφορών αλλά, και από την εξέλιξη στις μετακινήσεις εντός της κάθε χώρας. Η μεταφορά των επιβατών μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσα από μία ποικιλία τρόπων μεταφορών όπως είναι οι οδικές, οι σιδηροδρομικές, οι αεροπορικές και οι θαλάσσιες μεταφορές. Για τις χώρες εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ο κυριότερος, μεταξύ των προαναφερθέντων, τρόπος μεταφοράς επιβατών είναι το επιβατικό αυτοκίνητο, προτίμηση που βασίζεται στην επιθυμία για μεγαλύτερη κινητικότητα και ευελιξία. Η επιλογή του επιβατικού αυτοκινήτου δεν αφορά μόνο την κάλυψη μεγάλων αποστάσεων εντός μίας χώρας ή μίας περιφέρειας, αλλά ακόμα και την διάνυση μικρότερων αποστάσεων εντός αστικών ιστών. Αυτός ο υψηλός βαθμός εξάρτησης από το επιβατικό αυτοκίνητο ως μέσο μεταφοράς έχει συμβάλει, με άλλα λόγια, στην αύξηση της συμφόρησης και της ρύπανσης σε πολλές αστικές περιοχές και σε πολλές κύριες οδικές αρτηρίες. Στο παρακάτω σχήμα διακρίνεται ότι τα επιβατικά αυτοκίνητα αντιστοιχούσαν στο 82.9% των εσωτερικών μεταφορών επιβατών στην Ευρωπαϊκή Ένωση το έτος 2017, με τα υπεραστικά λεωφορεία, τα αστικά λεωφορεία και τα τρόλεϊ (9.4%) και τις επιβατικές αμαξοστοιχίες (7.8%) να αντιστοιχούν αμφότερα σε λιγότερο από το ένα δέκατο όλης της κυκλοφορίας (όπως αυτή μετρήθηκε σε επιβατοχιλιόμετρα).

Modal split of inland passenger transport, 2017

(% share in passenger-kilometres)



Note: countries are ranked on passenger cars. Powered two-wheelers are excluded. Cyprus, Malta and Iceland: railways not applicable.

(*) Includes estimates.

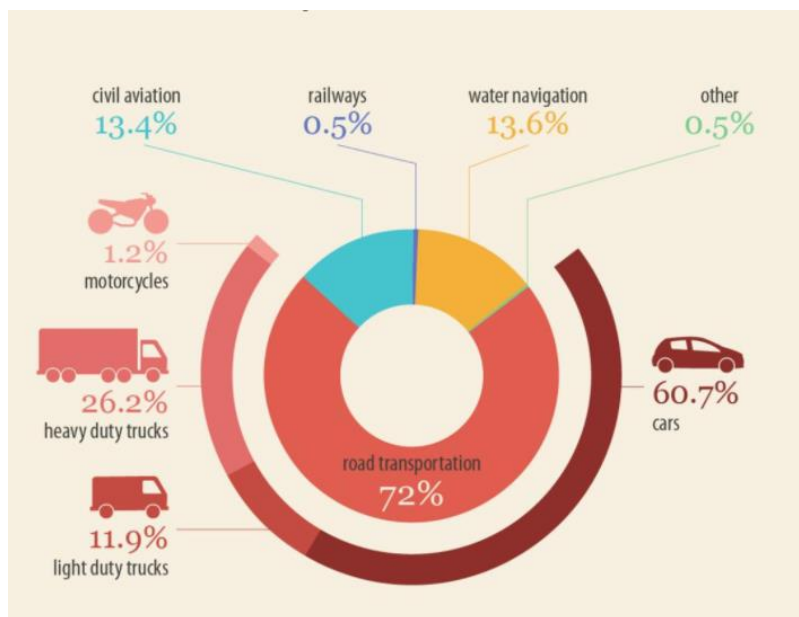
Source: Eurostat (online data code: tran_hv_psmo)

eurostat

Σχήμα 1: Ποσοστό συμμετοχής / τύπο οχήματος / χώρα E.E στις μεταφορές (2017)

Η αυξημένη χρήση του αυτοκινήτου, λοιπόν, καθώς και των λοιπών μέσων μεταφοράς, τα οποία διαθέτουν κινητήρες εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα με βάση

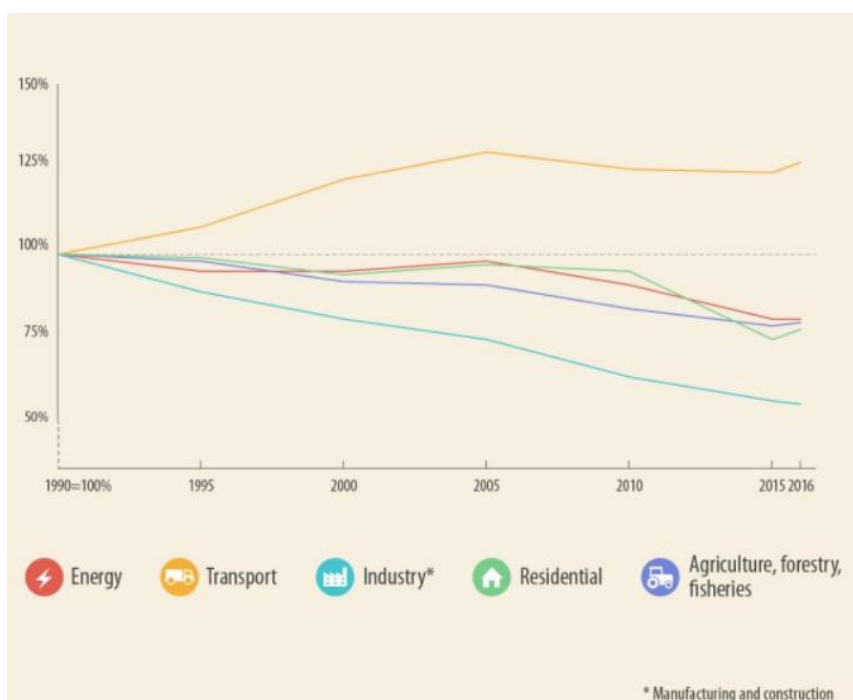
το πετρέλαιο, όπως βενζίνη και ντίζελ, προκειμένου να πραγματοποιήσουν την κίνηση τους, απελευθερώνουν διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Πρόκειται για ένα αέριο του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, η συσσώρευση του οποίου, αλλά και άλλων αερίων όπως είναι το μεθάνιο (CH₄), το νιτρώδες οξείδιο (N₂O) και οι υδροφθοράνθρακες (HFC), προκαλούν την θέρμανση της ατμόσφαιρας της Γης, με αποτέλεσμα αλλαγές στο κλίμα που ήδη έχουν αρχίσει και γίνονται αντιληπτές. Το έτος 2010 το 14% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (greenhouse gas emissions) προερχόταν μόνο από τον τομέα των μεταφορών, αναφερόμενοι στα ορυκτά καύσιμα που καίγονται για οδικές, σιδηροδρομικές, αεροπορικές και θαλάσσιες μεταφορές (*Unites States Environmental Protection Agency, EPA – Global Greenhouse Gas Emissions Data by Economic Sector*). Όσον αφορά την Ευρώπη, από το 2014, παρατηρείται μία συνεχής αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου προερχόμενες από τον τομέα των μεταφορών. Το έτος 2017 το ποσοστό συμμετοχής του τομέα αυτού στις εκπομπές ανήλθε στο 27%, το οποίο διαμορφώνεται σε 22%, εάν εξαιρεθούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που προέρχονται από διεθνείς αεροπορικές και θαλάσσιες μεταφορές. Σε σύγκριση, μάλιστα με το 2016 οι εκπομπές αυξήθηκαν κατά 2.2%, ποσοστό που οφείλεται κυρίως στην αύξηση των οδικών μεταφορών (*European Environment Agency, EEA – Greenhouse Gas Emissions from transport in Europe*). Αξίζει να αναφερθεί, ότι το 2016 σχεδόν το 72% των συνολικών εκπομπών αερίου διοξειδίου του άνθρακα οφειλόταν στις οδικές μεταφορές, όπως παρουσιάζεται και στο ακόλουθο διάγραμμα, από το οποίο είναι φανερό ότι τα αυτοκίνητα συμμετέχουν με το μεγαλύτερο ποσοστό στην ρύπανση από CO₂ στην Ευρώπη. (ποσοστό συμμετοχής των διαφόρων τρόπων οδικής μεταφοράς στην εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα – πηγή European Environment Agency):



Σχήμα 2: Ποσοστό συμμετοχής / τύπο οχήματος στην ρύπανση από CO₂
(<https://www.eea.europa.eu/>)

Επίσης, από το παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η εξέλιξη των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ανά οικονομικό τομέα από το έτος 1990 έως το 2016, με τον τομέα των μεταφορών να είναι ο μοναδικός που σημειώνει αύξηση εκπομπών σε σχέση με τους υπόλοιπους τομείς, οι οποίοι έχουν καταφέρει και έχουν διαγράψει μία πορεία μείωσης τους. Βέβαια, κάτι τέτοιο δεν είναι παράλογο, καθώς όπως έχει προαναφερθεί, με τις ανάγκες των πολιτών να

αυξάνονται και έτσι, με το να μετακινούνται όλο και περισσότεροι, οι εκπομπές CO₂ θα συνεχίσουν να βγαίνουν αυξανόμενες.



Σχήμα 3: Εξέλιξη εκπομπών CO₂ / οικονομικό τομέα περιόδου 1990 – 2016
(<https://www.eea.europa.eu/>)

Ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο είναι το γεγονός ότι η περιεκτικότητα του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα αυξήθηκε ταχύτερα από το 2018 έως το 2019, απ' ό,τι είχε αυξηθεί από το 2017 έως το 2018, καθώς και από τον μέσο όρο των δέκα τελευταίων ετών, σύμφωνα με έκθεση του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού. Τα στοιχεία του Π.Μ.Ο. αναφέρουν, επίσης, μία μείωση σε εκπομπές CO₂ της τάξεως του 4.2 με 7.5% εντός του 2020, γεγονός που οφείλεται στη μειωμένη ταξιδιωτική, κυκλοφοριακή δραστηριότητα και ευρύτερη παραγωγική δραστηριότητα των τελευταίων μηνών, λόγω των επιβεβλημένων μέτρων περιορισμού της διασποράς του κορονοϊού. Παρόλα αυτά, αν και θεωρείται θετικό δείγμα η συγκεκριμένη εξέλιξη, ο Π.Μ.Ο. σημειώνει ότι αποτελεί μία «μικρή κουκίδα» στον ευρύτερο καμβά της μακροχρόνιας συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, που προκαλεί το φαινόμενο του θερμοκηπίου και την κλιματική αλλαγή, και ότι οι παγκόσμιες εκπομπές πρέπει να μειώνονται κατά 7.6% κάθε χρόνο από το 2020 έως το 2030 ώστε, να υπάρχουν σοβαρές πιθανότητες να περιοριστεί η άνοδος της παγκόσμιας θερμοκρασίας στον 1.5 °C.

Η πραγματοποίηση, λοιπόν, μίας αξιοσημείωτης μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, και κυρίως, διοξειδίου του άνθρακα δεν θα είναι μία εύκολη διαδικασία, καθώς ο βαθμός μείωσης αυτών κινείται σε χαμηλά επίπεδα. Μένοντας στον τομέα των μεταφορών, με μέση πληρότητα 1.7 ανθρώπους ανά αυτοκίνητο στην Ευρώπη, μία εναλλακτική λύση στις οδικές μεταφορές αποτελούν τα λεωφορεία, ένα μέσο μεταφοράς το οποίο θα αποσυμφορήσει πληθώρα αστικών ιστών της Ευρώπης, στις οποίες κυριαρχεί το αυτοκίνητο ως η κυρίαρχη επιλογή για την μεταφορά επιβατών. Γενικά, τα λεωφορεία, ανεξάρτητα από τον τύπο κινητήρα που χρησιμοποιούν για την λειτουργία τους, προσφέρουν μία αποτελεσματική, τόσο σε εξοικονόμηση χώρου, ενέργειας, όσο και εκπομπών (UITP – Union Internationale des Transports Publics, 2011), μέθοδο δημόσιας μεταφοράς σε

σύγκριση, προφανώς, με την χρήση του αυτοκινήτου. Ακόμα και ένα ντίζελ λεωφορείο 12 μέτρων με χωρητικότητα 80 επιβάτες, εάν η πληρότητα του ανέρχεται σε ποσοστό 20%, για παράδειγμα, παράγει περίπου το ένα τρίτο των εκπομπών CO₂ ανά επιβατοχιλιόμετρο, σε σύγκριση με τον αντίστοιχο αριθμό ιδιωτικών οχημάτων που απαιτούνται για τη μεταφορά του ίδιου αριθμού ατόμων. Να σημειωθεί, εδώ, ότι στην Ευρώπη τα καινούργια αυτοκίνητα έχουν ένα μέσο επίπεδο εκπομπών αερίων CO₂ ίσο με 130 γραμμάρια ανά χιλιόμετρο, το οποίο μεταφράζεται σε κατανάλωση καυσίμου ως 5.6 λίτρα/100 χιλιόμετρα (*Directorate General for Climate Change Action, 2016*). Όταν η πληρότητα του λεωφορείου ανέρχεται στο 100%, το ποσοστό μείωσης των εκπομπών CO₂ ξεπερνάει το 90% (*UITP – Union Internationale des Transports Publics, 2011*).

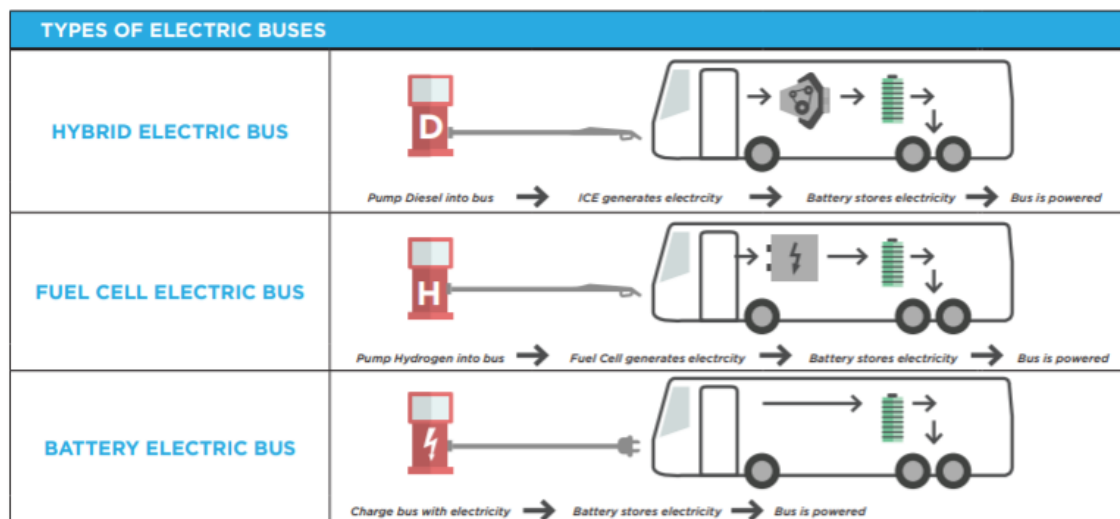
Το ερώτημα που γεννάται, βέβαια, σε αυτό το σημείο είναι τι είδους τεχνολογία θα χρησιμοποιηθεί για την κίνηση των λεωφορείων. Κατευθυνόμενοι και από όλα τα προαναφερθέντα στοιχεία, την απάντηση σε αυτό το ερώτημα θα την δώσει η ηλεκτροκίνηση. Υπάρχουν πολλοί λόγοι για τους οποίους η ένταξη της τεχνολογίας της ηλεκτροκίνησης σε ένα μέσο μαζικής μεταφοράς όπως το λεωφορείο κάθε άλλο παρά ελκυστική μπορεί να θεωρηθεί. Ένας από τους πιο προφανείς και ταυτόχρονα πολύ σημαντικούς λόγους είναι το γεγονός ότι παρόλο που τα ντίζελ λεωφορεία είναι πιο αποδοτικά σε σχέση με τα ιδιωτικά αυτοκίνητα, συμβάλλουν στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, οι οποίες θα μπορούσαν να μειωθούν σε μεγάλο βαθμό χρησιμοποιώντας τα ηλεκτρικά λεωφορεία. Ήδη πολλά κράτη έχουν αρχίσει και ερευνούν μέτρα για την μείωση αυτή ξεκινώντας από τους στόλους των δημόσιων μεταφορών που τα εξυπηρετούν, επενδύοντας σε εναλλακτικά κινητήρια συστήματα.

2.2: Τα Είδη των Ηλεκτρικών Λεωφορείων

Τα ηλεκτρικά λεωφορεία, όπως και τα αυτοκίνητα, διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, ανάλογα με το εάν η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται ή αποθηκεύεται στο λεωφορείο:

1. Τα υβριδικά λεωφορεία (hybrid electric buses - HEBs): ορίζονται εκείνα στα οποία η μία από τις μορφές ενέργειας που αξιοποιείται για την κίνησή τους είναι η ηλεκτρική. Παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης – ντίζελ.
2. Τα λεωφορεία με κυψέλες καυσίμου (fuel cell electric buses - FCEBs): ορίζονται εκείνα τα οποία κινούνται με ηλεκτρική ενέργεια η οποία παράγεται από την μονάδα ενεργειακών στοιχείων του οχήματος. Διαθέτουν και συσσωρευτές αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Η μονάδα αυτή λειτουργεί με καθαρό υδρογόνο, το οποίο αποθηκεύεται στο όχημα, και οξυγόνο από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Από την εξάτμιση του οχήματος βγαίνει καθαρό νερό.
3. Τα ηλεκτρικά λεωφορεία με αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτή (battery electric buses - BEBs). Τα συγκεκριμένα δεν διαθέτουν εφεδρική πηγή καυσίμου και φορτίζουν τους συσσωρευτές τους από το δίκτυο φόρτισης που υφίσταται στην περιοχή λειτουργίας τους.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται τα καθοριστικά στοιχεία των διαφορετικών τύπων ηλεκτρικών λεωφορείων που προαναφέρθηκαν:



Σχήμα 4: Καθοριστικά στοιχεία των διαφόρων τύπων ηλεκτρικών λεωφορείων
(<https://www.mrcagney.com/>)

Υπάρχουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που αφορούν τον κάθε τύπο ηλεκτρικού λεωφορείου ξεχωριστά. Βέβαια, και τα τρία είδη έχουν ορισμένα κοινά, τα οποία αναφέρονται στην συνέχεια:

- ♦ (+) *Εκπομπές*: και τα τρία είδη παράγουν σημαντικά λιγότερα βλαβερά αέρα του θερμοκηπίου.
- ♦ (+) *Μειωμένες δονήσεις*: αυξάνεται η άνεση των επιβατών και μειώνονται σημαντικά οι ζημιές στις γύρω υποδομές.
- ♦ (+) *Θόρυβος*: οι ηλεκτροκινητήρες παράγουν λιγότερο θόρυβο σε σχέση με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης και δεν λειτουργούν όταν το λεωφορείο είναι σταματημένο.
- ♦ (+) *Εξοικονόμηση καυσίμου*: όλα τα είδη ηλεκτρικών λεωφορείων χαρακτηρίζονται από την αυξημένη ενεργειακή απόδοση.
- ♦ (-) *Κόστος*: οι επιλογές στα ηλεκτρικά λεωφορεία είναι, τουλάχιστον προς το παρόν, πιο ακριβές εν συγκρίσει με την εναλλακτική των ντίζελ.
- ♦ (-) *Υποδομές*: όλα τα είδη ηλεκτρικών λεωφορείων απαιτούν διαφορετικού τύπου υποδομές προκειμένου να εξυπηρετείται η ομαλή λειτουργία τους.

2.3: Η Ένταξη του Ηλεκτρικού Λεωφορείου στις Μεταφορές

Από τους τρεις προαναφερθέντες τύπους ηλεκτρικών λεωφορείων αυτός για τον οποίο θα γίνεται λόγος από αυτό το σημείο και για την συνέχεια της εργασίας αυτής θα είναι εκείνος που αντιστοιχεί στα ηλεκτρικά λεωφορεία. Είναι, άλλωστε, λογικό αφού, σύμφωνα και με τους τελευταίους κανονισμούς για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, τα μέσα μαζικής

μεταφοράς καλούνται να αντιμετωπίσουν πολλές προκλήσεις για την ανάπτυξη των ηλεκτροκίνητων υπηρεσιών μηδενικών εκπομπών ρύπων. Το Συμβούλιο Υπουργών Περιβάλλοντος, συγκεκριμένα, ενέκρινε μεταξύ άλλων τον Κανονισμό για τον Ευρωπαϊκό Κλιματικό Νόμο, μετά και τα συμπεράσματα του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου της 10ης και 11ης Δεκεμβρίου 2020 σε επίπεδο αρχηγών κρατών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, για την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 55% έως το έτος 2030 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990.

Το ηλεκτρικό λεωφορείο κινείται από έναν ή και περισσότερους ηλεκτροκινητήρες, οι οποίοι αντλούν ενέργεια από τις ενσωματωμένες σε αυτό μπαταρίες, οι οποίες με την σειρά τους έχουν αντλήσει ενέργεια από το ηλεκτρικό δίκτυο. Η αποθηκευμένη αυτή ενέργεια στην μπαταρία μετά από ένα χρονικό διάστημα λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα εξαντλείται και τότε χρειάζεται να πραγματοποιηθεί επαναφόρτιση αυτής.

Τα ηλεκτρικά οχήματα τα τελευταία χρόνια προσφέρουν μια περιβαλλοντικά φιλική λύση στον τομέα των μεταφορών, και με τη μαζική χρήση τους συμβάλλουν στη μείωση των επιζήμιων ρύπων που παράγονται από τον συγκεκριμένο τομέα. Ενθαρρύνοντας, λοιπόν, την εφαρμογή εναλλακτικών τεχνολογιών μετακίνησης, όπως είναι τα αστικά ηλεκτρικά λεωφορεία, οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα, και γενικότερα, των βλαβερών αερίων θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα από τα αστικά λεωφορεία με μηχανές εσωτερικής καύσης, τα οποία χρησιμοποιούν ως καύσιμο το ντίζελ, θα μειωθούν. Θα επηρεάσουν, μάλιστα, δραστικά στην ασφάλεια και στην βιωσιμότητα των αστικών περιβαλλόντων αλλά, και στην γενικότερη ευεξία της κοινωνίας, με τους χρήστες των συγκεκριμένων μέσων μαζικής μεταφοράς να ξοδεύουν λιγότερο χρόνο καθισμένοι στην κίνηση, κάτι που θα ενθαρρύνει και τους πολίτες που έως τώρα επέλεγαν το αυτοκίνητό τους για τις αστικές μετακινήσεις να αλλάξουν και να κατευθυνθούν προς έναν εναλλακτικό και φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο μετακίνησης.

2.3.1: Οι Κατηγορίες Των Ηλεκτρικών Λεωφορείων

Τα ηλεκτρικά λεωφορεία με αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτή είναι δυνατόν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία είναι τα 'ευκαιριακά' ηλεκτρικά λεωφορεία, τα οποία χαρακτηρίζονται από μικρότερη αυτονομία αλλά, οι μπαταρίες τους μπορούν να φορτίσουν σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα, ακόμα και κατά την διάρκεια της ημέρας, υπό τις κατάλληλες συνθήκες. Η δεύτερη κατηγορία είναι τα ολονύκτια ηλεκτρικά λεωφορεία, τα έχουν μία μεγαλύτερη αυτονομία που βοηθάει στην ολοκλήρωση της υπηρεσίας μίας ολόκληρης ημέρας, και χρεώνονται με βάση τις βραδινές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας. Η αυτονομία των ηλεκτρικών κυμαίνεται συνήθως από τα 30 έως τα 70 χιλιόμετρα περίπου και είναι δυνατόν να επαναφορτίσει το 80% των μπαταριών τους σε 5 με 10 λεπτά (Mahmoud et al., 2016). Τα ολονύχτια ηλεκτρικά λεωφορεία ενδέχεται επίσης να χρησιμοποιηθούν με κάποια ευκαιριακή φόρτιση στην διάρκεια της ημέρας. Να σημειωθεί, εδώ, ότι η αυτονομία ενός ηλεκτρικού λεωφορείου μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με της συνθήκες λειτουργίας, το εάν είναι ενεργός ο κλιματισμός / καλοριφέρ ή όχι, τον μέσο όγκο των επιβατών, την συμπεριφορά του οδηγού κατά την οδήγηση, την κλίση της διαδρομής και άλλα. Οι παραπάνω είναι μερικοί από τους παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας ενός ηλεκτρικού λεωφορείου και κατ' επέκταση να μειωθεί σημαντικά η αυτονομία του. Στην πράξη, το εύρος ενός BEB διέπεται από τις σχεδιαστικές επιλογές του κατασκευαστή. Ένα BEB μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να έχει

εύλογο εύρος με την εγκατάσταση, για παράδειγμα, διαφορετικών μπαταριών – μεγαλύτερης χωρητικότητας. Οι δύο κύριες συνέπειες της αύξησης του εύρους (αυξάνοντας το μέγεθος της μπαταρίας) είναι αυξημένη τιμή αγοράς του οχήματος και αυξημένη μάζα αυτού.

2.3.2: Τα Πλεονεκτήματα του Ηλεκτρικού Λεωφορείου

Η ηλεκτροκίνηση στις μεταφορές έχει ήδη κάνει την εμφάνισή της σε αρκετές χώρες ανά τον κόσμο, καθώς όλο και περισσότερα οχήματα ελαφρού και βαρέως τύπου εισάγονται στην αγορά. Όσον αφορά τα ηλεκτρικά λεωφορεία συγκεκριμένα, είναι και αυτά, πλέον, μέρος της αγοράς είτε εδώ και πολλά χρόνια σε πόλεις όπως η Shenzhen της Κίνας, η οποία πραγματοποίησε μεγάλη επένδυση και άρχισε να κυκλοφορεί ηλεκτρικά λεωφορεία από το 2011, με αποτέλεσμα ολόκληρος ο στόλος της με πάνω από 16.300 λεωφορεία – ο οποίος είναι και ο μεγαλύτερος από κάθε άλλη πόλη στον κόσμο – να έχει αντικατασταθεί από ηλεκτρικά μέχρι το 2017, είτε έχουν εισχωρήσει στο στόλο διαφόρων χωρών αλλά όχι σε μεγάλο ποσοστό, είτε βρίσκονται στο στάδιο της δοκιμής των ηλεκτρικών λεωφορείων και της εύρεσης ενός βέλτιστου τρόπου ένταξης στο δίκτυο τους.



Σχήμα 5: Ηλεκτρικό λεωφορείο κατά την φόρτιση (1)



Σχήμα 6: Ηλεκτρικό λεωφορείο κατά την φόρτιση (2)

Η είσοδος αυτού του είδους λεωφορείων στον στόλο διαφόρων πόλεων ανά τον κόσμο παρέχει πολλά πλεονεκτήματα τόσο για τους οργανισμούς που τα αγοράζουν, για τις πόλεις που εξυπηρετούν, όσο και για τις ηλεκτρικές επιχειρήσεις που τα τροφοδοτούν. Συγκεκριμένα:

- ♦ Τα ηλεκτρικά λεωφορεία είναι πολύ αποδοτικά και έχουν χαμηλότερο λειτουργικό κόστος από τα λεωφορεία με μηχανή εσωτερικής καύσης – ντίζελ. Η εξοικονόμηση καυσίμων μπορεί να είναι σημαντική κατά τη σύγκριση της ηλεκτρικής ενέργειας με το ντίζελ, και τα λεωφορεία αυτά απαιτούν λιγότερα ανταλλακτικά και ανάγκες συντήρησης. Η ηλεκτρική ενέργεια, άλλωστε, είναι πολύ λιγότερο ακριβή από την βενζίνη. Το κόστος για την τροφοδοσία ενός λεωφορείου με ηλεκτρικό ρεύμα είναι περίπου το ένα τρίτο του κόστους τροφοδοσίας με πετρέλαιο, γεγονός που εξοικονομεί σημαντικά χρήματα με την πάροδο του χρόνου. Το κόστος συντήρησης, επίσης, είναι κατά 25% χαμηλότερο σε σύγκριση με αυτό ενός ντίζελ λεωφορείου, αφού, για παράδειγμα, το ότι δεν λειτουργούν με καύσιμο δεν απαιτεί αλλαγές λαδιών, δεν απαιτούνται αλλαγές φίλτρων αέρα, μπουζί, συντήρηση του κιβωτίου ταχυτήτων.

Επίσης, το ότι η οδήγηση είναι πολύ πιο ομαλή βοηθάει και στην ομαλότερη λειτουργία των φρένων συμβάλλοντας στην μεγαλύτερη διάρκεια ζωής τους. Είναι δυνατόν, έτσι, να εξοικονομήσουν εκατοντάδες χιλιάδες ευρώ κατά τη διάρκεια της ζωής τους από την εξοικονόμηση σε καύσιμα και σε συντήρηση, τα οποία μπορούν να επενδυθούν στον λειτουργικό οργανισμό ή σε άλλους φορείς που εξυπηρετούν τις μετακινήσεις σε μία πόλη. Ένα παράδειγμα που απεικονίζει το μέγεθος της εξοικονόμησης αυτής είναι η περίπτωση της πόλης Greensboro στη Νότια Καρολίνα, για την οποία εκτιμήθηκε ότι με την αντικατάσταση του στόλου των ντίζελ λεωφορείων από αμιγώς ηλεκτρικά το ποσό που θα εξοικονομηθεί από τα καύσιμα ανέρχεται στα \$160,000 ενώ, από την συντήρηση στα \$185,000 σε όλη την διάρκεια ζωής του λεωφορείου (Adam Fischer, former transportation director and his team).

- ♦ Τα ηλεκτρικά λεωφορεία είναι ασφαλή και αξιόπιστα. Οι ήσυχες, ομαλές εκτελέσεις των δρομολογίων τους επιτρέπουν στους επιβάτες να χαλαρώνουν και να συνομιλούν εύκολα, λόγω της έλλειψης κινητήρα ντίζελ, η οποία έχει ως αποτέλεσμα και την μείωση των επιπέδων της ηχορύπανσης. Το γεγονός, μάλιστα, ότι δεν λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα σημαίνει πως δεν παράγουν τα βλαβερά αέρια που εκπέμπουν τα οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης στην ατμόσφαιρα. Αυτό συμβάλλει στην μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, τα οποία δημιουργούν ή πιο ορθά κάνουν εντονότερα τα ήδη υπάρχοντα ζητήματα – υπερθέρμανση του πλανήτη και ατμοσφαιρική ρύπανση. Δημιουργείται, έτσι, ένα καθαρότερο και υγιέστερο περιβάλλον. Επίσης, λόγω της έλλειψης εξάτμισης και γενικότερα κινητήρα εσωτερικής καύσης, οι δονήσεις είναι σημαντικά μειωμένες, και μειώνονται σε μεγάλο βαθμό τα επίπεδα της ηχορύπανσης.
- ♦ Οι απώλειες ενέργειας από τον ηλεκτροκινητήρα ενός ηλεκτρικού λεωφορείου είναι σημαντικά χαμηλότερες από αυτές ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης, και άρα το κόστος ανά χιλιόμετρο κατά την χρήση του ηλεκτρικού λεωφορείου είναι περίπου το 1/3 σε σχέση με ένα λεωφορείο ντίζελ.
- ♦ Για τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας που τροφοδοτούν τα ηλεκτρικά λεωφορεία, η τεχνολογία μπορεί να βελτιώσει την αξιοπιστία και τη βιωσιμότητα του δικτύου βοηθώντας στη διαχείριση της μέγιστης ζήτησης και υποστηρίζοντας την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

2.3.3: Τα Μειονεκτήματα και οι Προκλήσεις των Ηλεκτρικών Λεωφορείων

Εκτός, βέβαια, από όλα τα παραπάνω πλεονεκτήματα που παρέχουν τα ηλεκτρικά λεωφορεία, δημιουργούνται και ορισμένες προκλήσεις τις οποίες καλείται να επιλύσει η πόλη που θα αποφασίσει να τα εντάξει στο σύστημα της δημόσιας συγκοινωνίας που την εξυπηρετεί. Αναλυτικότερα:

- ♦ Η κατασκευή των ηλεκτρικών οχημάτων κοστίζει πολύ περισσότερο και είναι επόμενο να κοστίζουν πολύ πιο ακριβά και κατά την αγορά τους. Εάν ένα ηλεκτρικό όχημα κοστίζει περίπου 20,000 με 30,000 ευρώ παραπάνω από ένα συμβατικό όχημα με κινητήρα εσωτερικής καύσης, τότε ένα ηλεκτρικό λεωφορείο μπορεί να κοστίσει δύο έως τρεις φορές περισσότερο. Μέχρι να αναπτυχθεί περαιτέρω η τεχνολογία κατασκευής τέτοιου είδους οχημάτων και να γίνει φθηνότερη στην παραγωγή, όποιος αναζητά ηλεκτρικό

λεωφορείο πρέπει να είναι προετοιμασμένος να καταθέσει ένα σημαντικό ποσό σε προκαταβολή - ειδικά όταν πρόκειται για την αγορά ενός ολόκληρου στόλου.

- ♦ Η αγορά ενός ηλεκτρικού λεωφορείου είναι απλά η αρχή της ένταξης της συγκεκριμένης τεχνολογίας στις δημόσιες συγκοινωνίες. Οι πόλεις που κάνουν αυτοί την αρχή χρειάζεται να διαθέσουν ένα αξιοσημείωτο ποσό στην εγκατάσταση υποδομών φόρτισης, προκειμένου να είναι δυνατή η φόρτιση των μπαταριών των ηλεκτρικών λεωφορείων.
- ♦ Χρειάζεται να πραγματοποιηθούν ορισμένες προσαρμογές στο ενεργειακό σύστημα ανάλογα με την περιοχή την οποία θα εξυπηρετούν τα ηλεκτρικά λεωφορεία.
- ♦ Πρέπει να ληφθούν υπόψιν αρκετές παράμετροι ώστε, να διαμορφωθεί ένα πρόγραμμα λειτουργίας των ηλεκτρικών λεωφορείων, το οποίο να είναι βιώσιμο και να μην δημιουργεί προβλήματα, όπως καθυστερήσεις στα δρομολόγια λόγω της ανάγκης φόρτισης των μπαταριών. Τα συστήματα μεταφορών, γενικά, είναι περίπλοκα και υπάρχουν διαθέσιμες τεχνολογίες στην αγορά, γεγονός που καθιστά ακόμα πιο δύσκολη την επιλογή των καλύτερων λύσεων τόσο από συστηματικής όσο και από τεχνοοικονομικής άποψης. Άλλωστε, η κάθε πόλη είναι μοναδική, οπότε δεν υφίσταται κάποια λύση που να είναι εφαρμόσιμη και να ταιριάζει σε όλες.

Στην παρακάτω εικόνα γίνεται μία σύγκριση των χαρακτηριστικών των διαφορετικών τύπων ηλεκτρικών λεωφορείων σε σύγκριση με τα ντίζελ λεωφορεία:

	HEB	FCEB	BEB
Purchase price			
\$	+50%	+200%	+100%
Maintenance costs			
	More	Much more	Less
Operating costs			
	Less	Much more	Much less
Infrastructure			
	More	More	More
Range			
	Less	Less	Much less
Weight			
	More	More	More
Refuel time			
	Less	More	More
Emissions			
CO ₂	-20%	-75%	-85%

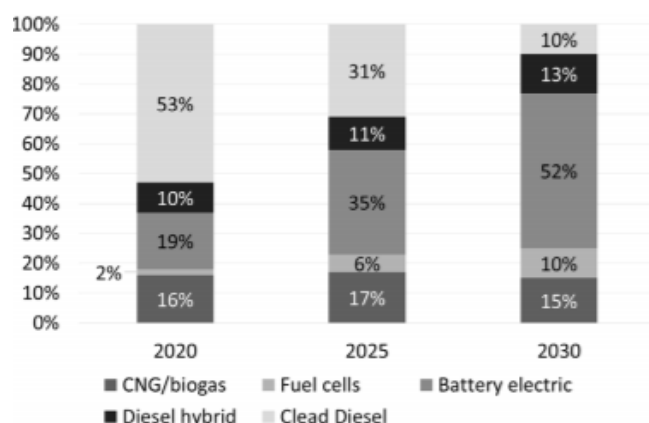
Σχήμα 7: Σύγκριση μεταξύ HEB, FCEB και BEB (<https://www.qiiresearch.com/>)

Όπως γίνεται αντιληπτό, ενώ η τιμή για την αγορά ενός ηλεκτρικού λεωφορείου με αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτή είναι σημαντικά υψηλότερη σε σχέση με

τους υπόλοιπους τύπους ηλεκτρικών λεωφορείων, το ποσοστό μείωσης των εκπομπών ρύπων – το οποίο είναι και από τα πιο σημαντικά θέματα – χάρη σε αυτή την τεχνολογία είναι αρκετά μεγάλο – ανέρχεται στο 85%.

2.4: Η Πηγή Ενέργειας του Ηλεκτρικού Λεωφορείου

Το ηλεκτρικό λεωφορείο είναι ένα είδος ηλεκτρικού οχήματος. Ο όρος "ηλεκτρικό όχημα" αναφέρεται σε οποιοδήποτε όχημα χρησιμοποιεί ηλεκτροκινητήρες ως μέσο προώθησης, επομένως το ηλεκτρικό λεωφορείο, χρησιμοποιεί και αυτό ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος τροφοδοτείται με ισχύ από ηλεκτρισμό. Όπως έχει προαναφερθεί, λόγος γίνεται για τον τύπο ηλεκτρικών λεωφορείων με αποθήκευση ενέργειας σε ενσωματωμένους συσσωρευτές (μπαταρίες). Ο τύπος μπαταριών εκείνος, ο οποίος έχει εισέλθει στην καθημερινότητα των ανθρώπων από τα κινητά τηλέφωνα και τα ηλεκτρικά εργαλεία, μέχρι τα ηλεκτρικά ποδήλατα και τα αυτοκίνητα είναι οι μπαταρίες Ιόντων – Λιθίου (Lithium – ion). Γενικότερα, η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί εύκολα να παραχθεί, να μεταφερθεί, να ρυθμιστεί και να υποβληθεί σε επεξεργασία, αλλά δεν μπορεί να αποθηκευτεί για χρήση σε επόμενη στιγμή χωρίς να υπάρχει μία σύνδεση με την πηγή της ενέργειας αυτής. Είναι κάτι εντελώς διαφορετικό από τα υγρά καύσιμα, εννοώντας τόσο τα ορυκτά όσο και τα βιοκαύσιμα. Σήμερα, η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται αποκλειστικά σε ηλεκτροχημικές μπαταρίες, οι οποίες σε σχέση με τα υγρά καύσιμα, παρουσιάζουν αρκετά μειονεκτήματα, με κυριότερα τις μικρές ειδικές ενέργειες και τον περιορισμένο κύκλο ζωής τους. Με την ανάλυση, όμως, που έχει προηγηθεί αναφορικά με την ανάγκη μείωσης των εκπομπών ρύπων στην ατμόσφαιρα, δεν είναι λίγοι οι λόγοι που οδηγούν στην μετάβαση από την χρήση του πετρελαίου στις μεταφορές στην χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας. Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται μία πρόγνωση όσον αφορά την αγορά των λεωφορείων καθώς και ο τύπος αυτών, που θα εξυπηρετούν τις μεταφορές σε βάθος δεκαετίας – έως το 2030 (Piotr Julian Biczal and Maciej Kwiatkowski, 2018):



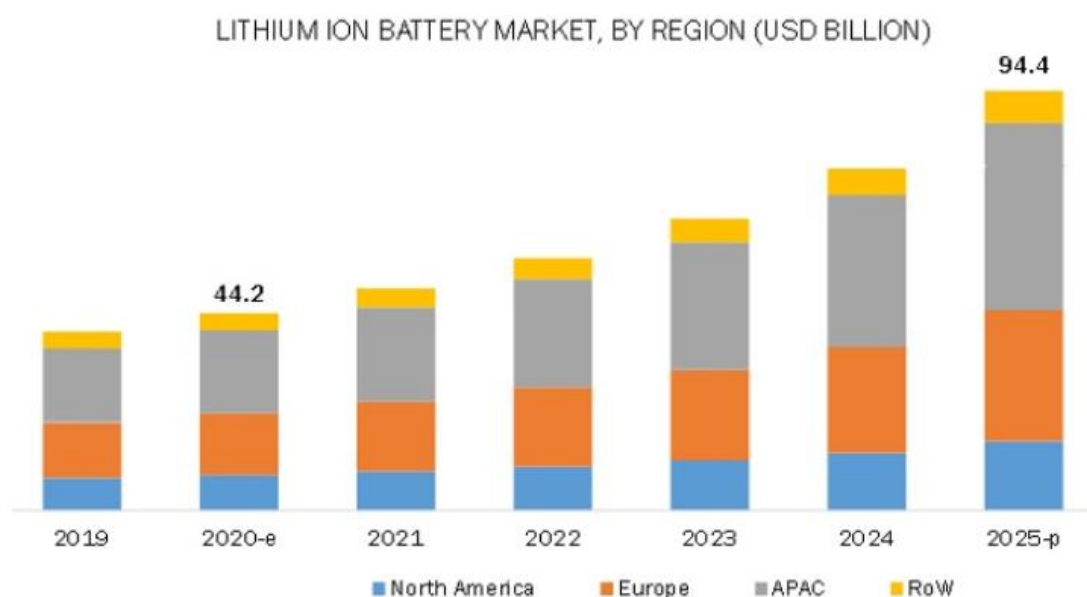
Σχήμα 8: Πρόγνωση για την αγορά - τύπο ηλεκτρικών λεωφορείων έως το 2030 (<https://www.matec-conferences.org/>)

Η βασική παράμετρος για οποιοδήποτε ηλεκτρικό όχημα είναι η κατανάλωση ενέργειας που μετρείται σε kWh / km, η οποία συνδέεται, κυρίως, με το βάρος του ίδιου του οχήματος. Έτσι,

στην κατηγορία του ηλεκτρικού λεωφορείου ο αγώνας για μείωση του συνολικού βάρους των μπαταριών με σκοπό την απόκτηση της υψηλότερης ενεργειακής πυκνότητας είναι ένα θέμα το οποίο πρέπει να αντιμετωπιστεί.

2.4.1: Η Παγκόσμια Αγορά στις Μπαταρίες Ιόντων – Λιθίου

Με βάση στοιχεία από την πηγή “*Research and Markets*” η παγκόσμια αγορά στις μπαταρίες ιόντων – λιθίου άγγιξε τα 34.1 δισεκατομμύρια δολάρια (USD) το 2020. Η εκτίμηση, μάλιστα, από το “*Markets and Markets*” αναφέρει ότι μέχρι το 2025 το ποσό αυτό θα έχει αυξηθεί στα 94.4 δισεκατομμύρια δολάρια (USD). Σε αυτή την περίοδο πρόβλεψης το μεγαλύτερο μέρος της αγοράς θα κατέχουν οι μπαταρίες ιόντων – λιθίου για τα ηλεκτρικά οχήματα (είτε πρόκειται για αυτοκίνητα, λεωφορεία ή φορτηγά). Αυτό είναι λογικό, καθώς η έγκριση των διαφόρων περιβαλλοντικών κανονισμών για τις εκπομπές, έχει οδηγήσει σε μία αυξανόμενη ευαισθητοποίηση στο θέμα της ηλεκτροκίνησης και στην υιοθέτηση της τεχνολογίας αυτής από όλο και περισσότερες χώρες ανά τον κόσμο, και άρα σε μία αύξηση της ζήτησης για τον συγκεκριμένο τύπο μπαταριών. Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται η εξέλιξη στην αγορά των μπαταριών ιόντων – λιθίου ανά ήπειρο σε δισεκατομμύρια δολάρια (USD):



Σχήμα 9: Η εξέλιξη της αγοράς μπαταριών Li - ion / ανά ήπειρο
(<https://www.marketsandmarkets.com/>)

2.4.2: Η Μπαταρία Ιόντων – Λιθίου και οι Τύποι Κυψελών

Μία μπαταρία ιόντων – λιθίου αποτελείται από διάφορα μέρη. Ένα από τα σημαντικότερα και κρίσιμότερα αυτών, το οποίο λειτουργεί και ως η κινητήριος δύναμη της μπαταρίας είναι η κυψέλη. Ανάμεσα στους διάφορους τύπους κυψελών ιόντων – λιθίου που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, τα λεωφορεία χρησιμοποιούν, προς το παρόν, τρεις διαφορετικούς τύπους κυψελών ιόντων – λιθίου: NMC (Lithium Nickel Manganese

Cobalt, Li – NMC), LFP (Lithium Iron Phosphate) και LTO (Lithium Titanium Oxide). Αυτές διαφέρουν ως προς την δομή και την χημική σύνθεση των ηλεκτροδίων και των ηλεκτρολυτών και επομένως, ως προς την χωρητικότητα και την ισχύ φόρτισης και αποφόρτισης, τις συνθήκες κάτω από τις οποίες λειτουργούν και πάνω από όλα, την ενεργειακή πυκνότητα (Wh / dm³) και την ειδική ενέργεια (Wh / kg). Ένας ακόμη αξιοσημείωτος τύπος είναι ο LCO (Lithium Cobalt Oxide), ο οποίος είναι ο αμέσως πιο γνωστός τύπος μετά τον LFP. Ο τύπος αυτός έχει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και χρησιμοποιείται κυρίως ως η πηγή ενέργειας για ηλεκτρονικές συσκευές, όπως κινητά τηλέφωνα, φορητοί υπολογιστές, ψηφιακές κάμερες και άλλα. Ωστόσο, η μικρή διάρκεια ζωής, η χαμηλή θερμική σταθερότητα και η περιορισμένη πυκνότητα ισχύος τον καθιστούν ακατάλληλο για πιο μεγάλες εφαρμογές. Οι μπαταρίες ιόντων – λιθίου μπορούν να φορτίσουν σχετικά γρήγορα, αν και ο χρόνος φόρτισης ποικίλλει ανάλογα με την κατηγορία – χημική σύνθεση και εγγενή χαρακτηριστικά του υλικού – για την οποία γίνεται λόγος. Για παράδειγμα, ο τύπος LTO μπορεί να φορτίσει με μεγαλύτερο ρυθμό σε σύγκριση με τον LFP.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η σύνθεση των τριών διαφορετικών τύπων κυψελών ιόντων – λιθίου:

Cell type	Cathode	Anode
NMC	LiNi _x Mn _y Co _z O ₂	graphite
LFP	LiFePO ₄	graphite
LTO	LiCoO ₂	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂

Σχήμα 10: Η σύνθεση των τριών διαφορετικών τύπων κυψελών ιόντων – λιθίου (<https://www.matec-conferences.org/>)

Μελλοντικά, θα εισαχθούν στην αγορά και δύο ακόμα τύποι κυψελών, ο LIC (Lithium ion Capacitor) και νέοι τύπου κυψελών NMC, όπως ο NMC811.

2.4.3: Ανάλυση και Εφαρμογή στα Ηλεκτρικά Λεωφορεία

Σύμφωνα με στοιχεία από την δημοσίευση των *Piotr Julian Biczal* και *Maciej Kwiatkowski*: “*Batteries in a vehicle – conditions, capabilities and limitations*” ένα τυπικό αστικό λεωφορείο με κινητήρα ντίζελ (200 kW) που χρησιμοποιείται συχνότερα στην Ευρώπη έχει μήκος 12 m και μπορεί να μεταφέρει συνολικά 105 άτομα. Η μεικτή μάζα του οχήματος αυτού ανέρχεται στους 18 τόνους και το φορτίο – νεκρό βάρος – που μπορεί να μεταφέρει όταν η πληρότητα είναι ίση με 100% ανέρχεται στους 10.4 με 13.2 τόνους. Να σημειωθεί, εδώ, ότι το νεκρό βάρος ενός λεωφορείου αναφέρεται στην φέρουσα ικανότητα του. Υπολογίζεται λαμβάνοντας το βάρος του λεωφορείου όταν είναι άδειο και αφαιρώντας το βάρος που έχει προστεθεί στο λεωφορείο όταν αυτό είναι γεμάτο. Ένα ηλεκτρικό λεωφορείο το οποίο έχει κατασκευαστεί στο ίδιο πλαίσιο – σασί και σώμα, μπορεί να μεταφέρει 83 επιβάτες – σύμφωνα με στοιχεία διαφόρων κατασκευαστών λεωφορείων – με την μεικτή μάζα του να είναι ίση, όπως και με το ντίζελ λεωφορείο, με 18 τόνους και οδηγείται με έναν κινητήρα 160 kW. Επομένως, το θέμα είναι στο τι διαφορά προκαλεί ο μειωμένος αριθμός επιβατών εάν η μεικτή μάζα του λεωφορείου δεν μεταβάλλεται και στο ότι πολλές από τις υπόλοιπες τιμές των διαφόρων παραμέτρων είναι παρόμοιες. Προκειμένου να λυθεί η συγκεκριμένη απορία,

θα πραγματοποιηθεί μία σύγκριση του βάρους και των δύο τύπων λεωφορείων – του ενός με τον κινητήρα ντίζελ και του άλλου με τον ηλεκτροκινητήρα. Η διαφορά στον αριθμό των επιβατών που μεταφέρονται είναι 22 άτομα. Μία μέση μάζα αυτών είναι περίπου ίση με 1700 κιλά. Η αλλαγή στον τύπο του κινητήρα του λεωφορείου μετατρέπει μέρη του κινητήρα εσωτερικής καύσης, όπως:

- ♦ Τον ίδιο τον κινητήρα μαζί με τον λοιπό εξοπλισμό του.
- ♦ Το κιβώτιο ταχυτήτων.
- ♦ Το ρεζερβουάρ καυσίμων.

σε ηλεκτρικά, δηλαδή:

- ♦ Ηλεκτρικός κινητήρας.
- ♦ Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος.
- ♦ Βοηθητικοί μετατροπείς ισχύος 24 V.
- ♦ Μπαταρίες με τον εξοπλισμό τους.

Όπως γίνεται φανερό στην συγκεκριμένη δημοσίευση, η συνολική μάζα του κινητήρα εσωτερικής καύσης και των προαναφερθέντων μερών του ανέρχεται στα 1120 kg ενώ, τα αντίστοιχα για τον ηλεκτροκινητήρα χωρίς την προσθήκη των μπαταριών ανέρχεται στα 600 kg, δηλαδή είναι τουλάχιστον 620 kg ελαφρύτερα. Η όλη ουσία κρύβεται, λοιπόν, στην μάζα της μπαταρίας, η οποία πιθανότατα δίνει μία αύξηση περίπου ίση με 1100 kg, όση, δηλαδή, η μάζα των 22 λιγότερων επιβατών λόγω της μετατροπής του λεωφορείου από ντίζελ σε ηλεκτρικό.

Η μπαταρία σε ένα ηλεκτρικό λεωφορείο είναι κατασκευασμένη από αρκετές εκατοντάδες κυψέλες, οι οποίες συνδέονται σε σειρά και παράλληλα. Εκτός, βέβαια, από τις κυψέλες αυτές, υφίστανται και άλλα στοιχεία, τα οποία συμμετέχουν στην συνολική μάζα της μπαταρίας, όπως:

- ♦ Η στέγαση ασφαλείας.
- ♦ Η ηλεκτρική προστασία.
- ♦ Το σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας, το οποίο συμβάλλει στην διατήρηση της σε ασφαλή κατάσταση, τόσο από την πλευρά της φόρτισης – αποφόρτισης, όσο και από την πλευρά της θερμοκρασίας.
- ♦ Η καλωδίωση.
- ♦ Το σύστημα ψύξης και θέρμανσης.

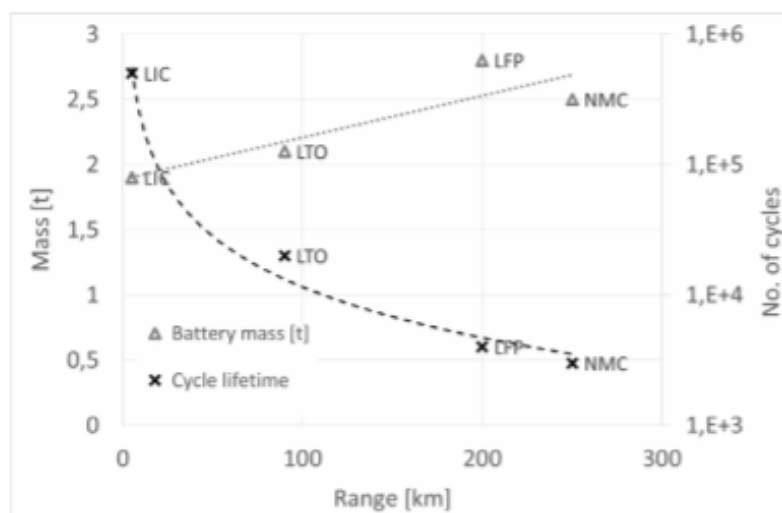
Όλα τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα η ειδική ενέργεια της μπαταρίας στο λεωφορείο να είναι χαμηλότερη από την ειδική ενέργεια των κυψελών από τις οποίες αυτή αποτελείται. Σε ένα ηλεκτρικό λεωφορείο 12 μέτρων, λοιπόν, με την εγκατάσταση από 2 έως 6 μπαταρίες ιόντων – λιθίου, η ενέργεια που μπορεί να έχει στο σύνολο μπορεί να είναι από 60 έως 300

kWh – 6 μπαταρίες με κυψέλες τύπου NMC. Αυτό μεταφράζεται σε μία αυτονομία μεταξύ 50 και 250 χιλιομέτρων χωρίς επαναφόρτιση της μπαταρίας. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι διαφορετικές παράμετροι για έξι τοποθετημένες μπαταρίες διαφορετικού τύπου κυψελών:

Cell type	Max. batt. capacity	Range	Min. char. time to 80% DoD	Max. char. curr.
	[kWh]	[km]	[min]	[A]
NMC	300	250	45	900
LFP	240	200	15	1500
LTO	120	90	5	1800
LIC	10	5	0,33	3000

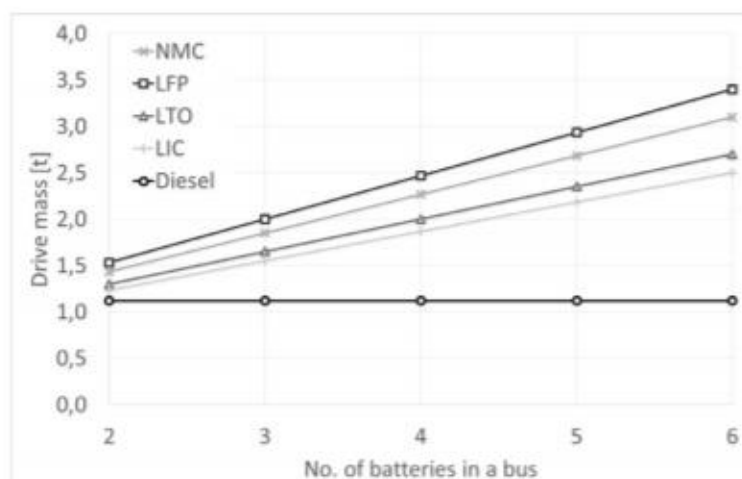
Σχήμα 11: Παράμετροι τοποθετημένων μπαταριών διαφορετικών κυψελών (<https://www.matec-conferences.org/>)

Όλα τα παραπάνω μεταφράζονται σε μάζα σύμφωνα με το ακόλουθο διάγραμμα:



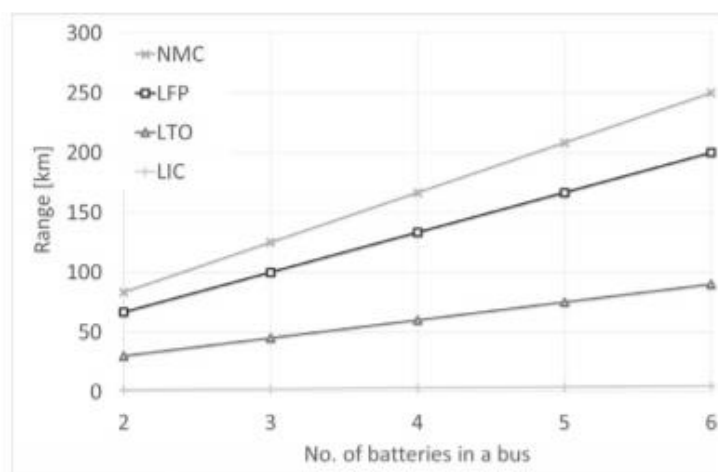
Σχήμα 12: Παρουσίαση της παραμέτρου 'μάζα' συναρτήσει της 'αυτονομίας' (<https://www.matec-conferences.org/>)

Διακρίνεται, λοιπόν, ότι οι μπαταρίες με κυψέλες τύπου LFP προσθέτουν την μεγαλύτερη μάζα στο όχημα, χωρίς να προσφέρουν την μεγαλύτερη αυτονομία, και αυτός είναι ο λόγος που στο συγκεκριμένο παράδειγμα γίνεται λόγος για μπαταρίες με κυψέλες τύπου NMC, παρόλο που είναι ασφαλέστερες και είναι δυνατόν να λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Από την άλλη πλευρά, οι κυψέλες τύπου LTO και LIC προσφέρουν λιγότερο στην αυτονομία και χρειάζονται συχνή και ταχεία φόρτιση. Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζεται το πως μεταβάλλεται η μάζα του ηλεκτρικού λεωφορείου ανάλογα του αριθμού των μπαταριών που είναι εγκατεστημένες σε αυτό, βάσει του τύπου των κυψελών των μπαταριών:



Σχήμα 13: Μεταβολή μάζας ηλεκτρικού λεωφορείου συναρτήσει του αριθμού μπαταριών, ανά τύπο κυψελών (<https://www.matec-conferences.org/>)

Έχει συμπεριληφθεί, προκειμένου να γίνει και μία σύγκριση, και η μάζα ενός λεωφορείου ντίζελ. Είναι προφανές, ότι σε κάθε σενάριο που παρουσιάζεται στο παραπάνω διάγραμμα, η μάζα ενός ηλεκτρικού λεωφορείου είναι πάντα μεγαλύτερη από αυτή ενός λεωφορείου ντίζελ, κι έτσι εξηγείται και το γεγονός ότι ο αριθμός των επιβατών που μπορεί να μεταφέρει είναι μικρότερος. Το ακόλουθο διάγραμμα απεικονίζει την αυτονομία ενός ηλεκτρικού λεωφορείου σαν μία συνάρτηση του αριθμού των μπαταριών για διαφορετικούς τύπους κυψελών:



Σχήμα 14: Η αυτονομία του ηλεκτρικού λεωφορείου συναρτήσει του αριθμού μπαταριών (<https://www.matec-conferences.org/>)

Οι τιμές αυτές είναι αρκετά μικρότερες σε σχέση με την αυτονομία που θα προσέφερε ένα λεωφορείο με κινητήρα ντίζελ. Το συμπέρασμα που συνάγεται από την ανάλυση που προηγήθηκε είναι ότι τόσο ο επενδυτής όσο και ο μελετητής πρέπει να επιλέξει το κατάλληλο λεωφορείο, το οποίο θα εξυπηρετεί καλύτερα την πόλη στην οποία θα κινείται, τι είδους κυψέλες πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην μπαταρία αλλά και τον αριθμό των μπαταριών που θα εγκατασταθούν στο ηλεκτρικό λεωφορείο. Γενικά, για μεγάλες διαδρομές με μικρό φορτίο, ενδείκνυται η χρήση μπαταριών ιόντων – λιθίου με κυψέλες NMC. Για μικρότερες

διαδρομές με μεγαλύτερο αριθμό επιβατών, ενδείκνυται η χρήση μπαταριών ιόντων – λιθίου με κυψέλες LTO, αν και οι συγκεκριμένες θα απαιτούν συχνή και γρήγορη φόρτιση στα άκρα των εκάστοτε γραμμών του δικτύου.

2.4.4: Οι Μπαταρίες Στερεάς Κατάστασης

Οι μπαταρίες ιόντων – λιθίου είναι, όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι πιο δημοφιλείς. Πέρα από το γεγονός ότι μπορεί κανείς να τις βρει παντού και είναι οι πιο κοινές επαναφορτιζόμενες μπαταρίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τα *smartphones* έως και τα ηλεκτρικά οχήματα, δεν είναι λίγες οι φορές που το είδος αυτό έχει ακουστεί και γραφτεί από διάφορα μέσα ενημέρωσης. Αυτό οφείλεται στο ότι – περιστασιακά – οι μπαταρίες αυτές έχουν την ικανότητα να αναφλέγονται. Δεν συμβαίνει, βέβαια, συχνά, αλλά όταν συμβαίνει κάτι τέτοιο δεν είναι καθόλου καλό, αφού τίθεται τόσο για τον χρήστη αυτής – είτε είναι επιβάτης σε ηλεκτρικό όχημα είτε χρήστης μίας συσκευής – θέμα ασφαλείας, όσο και χιλιάδων δολαρίων για τους κατασκευαστές.

Το εσωτερικό των μπαταριών ιόντων λιθίου, ανεξάρτητα μεγέθους και σχήματος – είναι σχεδόν ίδιο. Πρόκειται για τρία φύλλα: ένα θετικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος – cathode), ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο (άνοδος – anode) κι έναν διαχωριστή. Ο διαχωριστής, όπως δηλώνει και το ίδιο το όνομά του, διαχωρίζει την άνοδο από την κάθοδο και είναι ένα πολύ λεπτό φύλλο κατασκευασμένο από μικρό διάτρητο πλαστικό. Τα τρία αυτά φύλλα είναι εμβαπτισμένα σε έναν οργανικό διαλύτη που δρα ως ηλεκτρολύτης. Ο ηλεκτρολύτης της μπαταρίας είναι ένα αγώγιμο χημικό μείγμα το οποίο επιτρέπει την ροή του ρεύματος μεταξύ της ανόδου και της καθόδου. Όταν η μπαταρία φορτίζεται, τα ιόντα λιθίου κινούνται, διαμέσου του ηλεκτρολύτη, από την κάθοδο προς την άνοδο και προσδένονται πάνω στο υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένη η άνοδος. Κατά την αποφόρτιση της μπαταρίας τα ιόντα λιθίου επιστρέφουν στην κάθοδο. Στις μπαταρίες ιόντων – λιθίου ως ηλεκτρολύτης λειτουργεί ένα υγρό ηλεκτρολυτικό διάλυμα, το οποίο ρυθμίζει την ροή του ρεύματος. Αν, λοιπόν, ο διαχωριστής τρυπηθεί και τα ηλεκτρόδια έρθουν σε επαφή τότε η μπαταρία θερμαίνεται πολύ γρήγορα. Η θερμότητα προκαλεί την εξάτμιση του οργανικού διαλύτη που δρα ως ηλεκτρολύτης και ένας εγγύς σπινθήρας μπορεί να ανάψει όλη την μπαταρία με φλόγες.

Το πιο σημαντικό πρόβλημα, λοιπόν, των μπαταριών ιόντων – λιθίου είναι η ευφλεκτότητα, λόγω των υγρών ηλεκτρολυτών που χρησιμοποιούν. Αυτή η ευφλεκτότητα αυξάνει με την σειρά της και το κόστος και το μέγεθος των μπαταριών λόγω του ότι ‘φλέγοντα’ σαν και αυτό ζητήματα πρέπει να αντιμετωπιστεί, και προκειμένου να συμβεί αυτό, απαιτούνται ιδιαίτερες διατάξεις. Πολλοί ερευνητές, επομένως, έχουν προσανατολιστεί προς την ανάπτυξη μπαταριών στερεάς κατάστασης (solid – state batteries), οι οποίες δεν θα προσφέρουν πλεονεκτήματα μόνο σε τεχνικά θέματα (μείωση μεγέθους, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής ηλεκτρολυτών) αλλά, και σε θέματα ασφαλείας.

Οι μπαταρίες στερεάς κατάστασης συμπιέζουν την άνοδο, την κάθοδο και τον ηλεκτρολύτη σε τρία επίπεδα στερεά στρώματα, αντί να εμβαπτίζουν τα ηλεκτρόδια σε έναν υγρό και εύφλεκτο ηλεκτρολύτη. Αυτό σημαίνει ότι οι μπαταρίες αυτές μπορεί να είναι μικρότερες σε μέγεθος ή πιο επίπεδες σε σχέση με αυτές που έχουν υγρό ηλεκτρολύτη. Υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως στερεοί ηλεκτρολύτες είναι κεραμικά, γυαλί, θειούχο λίθιο και φθοριούχος μόλυβδος και διάφορα φυσικά πολυμερή, όπως το πολυαιθυλενοξειδίο. Είναι

επίσης ασφαλέστερες, καθώς δεν υπάρχει κανένα εύφλεκτο υγρό για να χυθεί και να αναφλεγεί, έχουν μεγαλύτερη διάρκεια κύκλου ζωής και μάλιστα, υπόσχονται 2.5 φορές περισσότερη ειδική ενέργεια από τις μπαταρίες ιόντων λιθίου και πολύ χαμηλούς χρόνους φόρτισης.

Σύμφωνα, μάλιστα, με την εταιρεία “QuantumSpace”, μία εταιρεία πρωτοπόρος στην ανάπτυξη μπαταριών λιθίου – μετάλλων στερεάς κατάστασης επόμενης γενιάς για χρήση σε ηλεκτρικά οχήματα, οι νέες αυτές μπαταρίες μπορούν να φορτίσουν έως και το 80% της πλήρους ισχύος σε λιγότερο από 15 λεπτά, σχεδόν δύο φορές πιο γρήγορα από τις μπαταρίες που χρησιμοποιεί το Tesla Model 3. Κάτι ανάλογο, βέβαια, θα ισχύει και για τα ηλεκτρικά λεωφορεία. Θα μπορούσαν, επίσης, να προσφέρουν πολλά περισσότερα χιλιόμετρα σε αυτονομία και να φορτίσουν έως 800 φορές με ελάχιστη απώλεια στην ικανότητά τους να διαχειριστούν την ηλεκτρική ενέργεια στην χρήση και στην αποθήκευση.

♦ Η εφαρμογή της από την Mercedes – Benz:

Μπορεί οι μπαταρίες στερεάς κατάστασης μικρής κλίμακας να χρησιμοποιούνται ήδη εμπορικά σε ορισμένες εφαρμογές, οι περισσότεροι ειδικοί εκτιμούν ότι οι μεγάλης κλίμακας μπαταρίες στερεάς κατάστασης για χρήση σε οχήματα απέχουν ακόμη αρκετά χρόνια από την εμπορευματοποίηση. Η Mercedes – Benz, όμως, προχώρησε στην εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας σε μία νέα έκδοση του δικού της ηλεκτρικού λεωφορείου *eCitaro G*, το οποίο απεικονίζεται στις παρακάτω εικόνες:



Σχήμα 15: Το eCitaroG της Mercedes Benz (1) (<https://www.mercedes-benz-bus.com/>)



Σχήμα 16: Το eCitaroG της Mercedes Benz (2) (<https://www.mercedes-benz-bus.com/>)

Η εταιρεία, μάλιστα, αναφέρει ότι: *‘τα οχήματα με μπαταρίες στερεάς κατάστασης δεν αναμένονταν μέχρι τα μέσα αυτής της δεκαετίας, αλλά η Mercedes – Benz είναι ταχύτερη και το νέο eCitaro G είναι το πρώτο λεωφορείο μαζικής παραγωγής στην κατηγορία του οπουδήποτε στον κόσμο, εξοπλισμένο με μπαταρίες στερεάς κατάστασης’*. Η Mercedes θα διαθέσει τα αρθρωτά λεωφορεία eCitaro G με προαιρετικές μπαταρίες στερεάς κατάστασης, ως εναλλακτική λύση ως προς τις παραδοσιακές μπαταρίες ιόντων λιθίου. Η εταιρεία λέει ότι οι μπαταρίες στερεάς κατάστασης προσφέρουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και βελτίωση κατά 25% στην ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με τα τελευταία στοιχεία ιόντων λιθίου.

Το συγκεκριμένο λεωφορείο θα εξοπλίζεται με μία συστοιχία μπαταριών στερεάς κατάστασης (χωρισμένη σε πέντε μονάδες στην οροφή) συνολικής χωρητικότητας 441 kWh, σε σύγκριση με 396 kWh για τη συστοιχία ιόντων λιθίου. Η αυτονομία εκτιμάται σε 136 μίλια σε μέσες συνθήκες, ή 105 μίλια το χειμώνα με τη λειτουργία του καλοριφέρ, μια βελτίωση περίπου 10 τοις εκατό σε σύγκριση με την επιλογή Li-ion. Η συστοιχία της μπαταρίας στερεάς κατάστασης αναμένεται, επίσης, να έχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής - η Mercedes εγγυάται τη μπαταρία στερεάς κατάστασης για 10 χρόνια ή 280 MWh ενεργειακής απόδοσης. Σύμφωνα, όμως, με την εταιρεία ένα μειονέκτημα είναι το γεγονός ότι οι μπαταρίες στερεάς κατάστασης *περιορίζονται στην ικανότητα γρήγορης φόρτισης* σε σύγκριση με την επιλογή μπαταριών ιόντων – λιθίου. Όπως, λοιπόν, γίνεται αντιληπτό, οι απόψεις όσον αφορά την διάρκεια ζωής ποικίλουν. Ωστόσο, μέχρι να προχωρήσει αυτό το είδος σε μαζική παραγωγή, αυτό το πρόβλημα αναμένεται να έχει λυθεί. Αξίζει, τέλος, να αναφερθεί, ότι κολοσσοί της αυτοκινητοβιομηχανίας που ασχολούνται με τις μπαταρίες στερεάς κατάστασης (BMW, Toyota και άλλοι) πιστεύουν σε αυτές και ήδη έχουν προχωρήσει στην εξέλιξη αυτών. Η πρόβλεψη, λοιπόν, είναι ότι αυτό το είδος μπαταριών θα αλλάξουν τον χάρτη της ηλεκτροκίνησης την επόμενη δεκαετία και έως τώρα, αποτελούν τον νούμερο ένα αντικαταστάτη των μπαταριών ιόντων – λιθίου.

2.5: Οι Στρατηγικές Φόρτισης

Η κύρια διαφοροποίηση μεταξύ των ηλεκτρικών λεωφορείων είναι το μέγεθος της μπαταρίας που φέρει το καθένα. Ένα ηλεκτρικό λεωφορείο μπορεί να λειτουργεί, συνήθως, με μπαταρίες χωρητικότητας από 38 έως 548 kW (συστοιχία μπαταριών). Οι διαφορετικές αυτές χωρητικότητες παρέχουν διαφορετικές αυτονομίες και διαφορετικούς χρόνους φόρτισης. Μία μπαταρία, δηλαδή, χωρητικότητας 250 kW μπορεί να παρέχει μία αυτονομία της τάξης των 200 km, ανάλογα βέβαια και με τον τρόπο και τις συνθήκες οδήγησης ενώ, μία μπαταρία 50 kW μπορεί να παρέχει εύρος της τάξης των 20 – 30 km. Ανάλογα με την ισχύ φόρτισης, ο χρόνος φόρτισης από το 20 στο 80% της χωρητικότητας της μπαταρίας μπορεί να διαρκέσει από 2 έως 4 ώρες για τις μπαταρίες μεγαλύτερης χωρητικότητας ενώ, οι μπαταρίες μικρότερης χωρητικότητας μπορεί να φορτίσουν σε μόνο 5 έως 10 λεπτά. Ο χρόνος φόρτισης, βέβαια, δεν εξαρτάται μόνο από την χωρητικότητα της μπαταρίας αλλά, και από την ισχύ φόρτισης του φορτιστή. Η ισχύς ενός τυπικού σταθμού φόρτισης για την φόρτιση των ηλεκτρικών λεωφορείων εκτείνεται από τα 40 έως τα 600 kW. Για κάθε χωρητικότητα μπαταρίας ο χρόνος φόρτισης μειώνεται καθώς η ισχύς φόρτισης αυξάνεται.

Κατά τον προγραμματισμό της ηλεκτροδότησης του στόλου των δημόσιων λεωφορείων τα οποία εξυπηρετούν ένα συγκεκριμένο δίκτυο πρέπει να προσδιοριστούν οι ανάγκες κάθε διαδρομής του λεωφορείου και να παραχθεί μία βέλτιστη λύση. Είναι, λοιπόν, απαραίτητο

να είναι γνωστές οι ενεργειακές απαιτήσεις κάθε διαδρομής, λαμβάνοντας υπόψιν παράγοντες όπως το μήκος της διαδρομής, τις ώρες λειτουργίας του λεωφορείου, την μέση ταχύτητα, τον αριθμό των στάσεων, τις συνθήκες οδήγησης και το είδος του οχήματος που χρησιμοποιείται. Έτσι, βάσει αυτών η ενεργειακή απαίτηση ανά διαδρομή μπορεί να διαφέρει. Προκειμένου να εγκατασταθεί μία αποτελεσματική υποδομή φόρτισης, πρέπει να επιλεγεί η πιο κατάλληλη στρατηγική φόρτισης λαμβάνοντας υπόψιν τις απαιτήσεις της εκάστοτε διαδρομής.

Σε αυτό το σημείο, λοιπόν, θα γίνει αναφορά στις διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης που είναι δυνατόν να υιοθετηθούν σε ένα δίκτυο αστικών συγκοινωνιών ο στόλος του οποίου αποτελείται από ηλεκτρικά λεωφορεία με αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτή. Βασιζόμενοι, λοιπόν, στον τύπο κυψελών που τελικά θα χρησιμοποιηθούν και στην προκύπτουσα αυτονομία του ηλεκτρικού λεωφορείου, είναι απαραίτητο να υιοθετηθεί η κατάλληλη στρατηγική φόρτισης ώστε, να ιδρυθούν και οι κατάλληλες υποδομές που θα εξυπηρετούν το εκάστοτε δίκτυο. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης προς υιοθέτηση ανάλογα την απαιτούμενη ενεργειακή χωρητικότητα, τα χαρακτηριστικά κάθε διαδρομής και την διαθεσιμότητα των θέσεων – στάσεων για την εγκατάσταση των φορτιστών. Σε γενικές γραμμές, οι βασικές στρατηγικές φόρτισης είναι οι εξής:

1. Καθημερινή ολονύχτια φόρτιση σε φορτιστές χαμηλής ισχύος (*depot charging*).
2. Γρήγορη επαναφόρτιση στο τέλος της διαδρομής και φόρτιση σε φορτιστές χαμηλότερης ισχύος κατά την διάρκεια της νύχτας, ώστε να υπάρχει μία ισορροπία.
3. Γρήγορη φόρτιση στα άκρα της διαδρομής.
4. Γρήγορη φόρτιση στα άκρα της διαδρομής – στο τέρμα – αλλά, και γρήγορη φόρτιση σε επιλεγμένες ενδιάμεσες στάσεις.

Οι στρατηγικές 3 και 4 αναφέρονται ως *end – stop charging* και *along the route charging*, εννοώντας την φόρτιση στους τερματικούς σταθμούς μίας διαδρομής και την φόρτιση κατά μήκος της διαδρομής. Μάλιστα, η στρατηγική 4 αναφέρεται και ως ευκαιριακή φόρτιση – *opportunity charging*. Είναι αναγκαίο να επιλεγεί η κατάλληλη στρατηγική με γνώμονα τις απαιτήσεις σε ενέργεια, τους χρόνους παραμονής στην στάση, τις δυνατότητες φόρτισης αλλά, και την διασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας των φορτιστών. Η τελική επιλογή στην στρατηγική φόρτισης μπορεί να επηρεάσει άμεσα το τελικό κόστος της ηλεκτροδότησης ενός στόλου λεωφορείων και να επιφέρει περιορισμούς σχετικά με την λειτουργία αυτών (*Kunith et al. 2017*).

2.5.1: Φόρτιση στο Αμαξοστάσιο (Depot Charging)

Η βασική και πιο δημοφιλής μέθοδος είναι η φόρτιση της μπαταρίας κατά την διάρκεια της νύχτας στο αμαξοστάσιο, την περίοδο, δηλαδή, κατά την οποία το λεωφορείο θα έχει ολοκληρώσει τα δρομολόγιά του και δεν θα βρίσκεται σε λειτουργία. Αυτό σημαίνει ότι το λεωφορείο πρέπει να είναι εξοπλισμένο με μπαταρίες μεγάλης χωρητικότητας, οι οποίες μπορούν να φορτίζουν αργά – για πολλές ώρες. Αυτή η μέθοδος δίνει την δυνατότητα να εγκατασταθούν φορτιστές χαμηλής ισχύος (συνήθως 100 kW και κάτω) – συνήθως έναν φορτιστή ανά λεωφορείο σε συνδυασμό με εκχωρητές (*dispensers*) – οι οποίοι είναι και

λιγότερο ακριβοί, αλλά θα απαιτούν οι συγκεκριμένες μπαταρίες περισσότερο χρόνο φόρτισης λόγω και της μεγάλης χωρητικότητας τους. Μπορούν, βέβαια, να χρησιμοποιηθούν και φορτιστές υψηλής ισχύος για την φόρτιση στο αμαξοστάσιο αλλά, δεν προτιμάται η εναλλακτική αυτή λόγω του υψηλού κόστους αγοράς τέτοιου είδους φορτιστών και του αρκετού χρόνου παραμονής των λεωφορείων στο αμαξοστάσιο, κάτι που σημαίνει ότι έχουν το χρονικό περιθώριο για πολύωρη φόρτιση.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι:

- ♦ Το χαμηλότερο αρχικό κόστος κεφαλαίου ανά λεωφορείο σε σχέση με άλλες μεθόδους φόρτισης.
- ♦ Επιτρέπει την φόρτιση κατά την διάρκεια ωρών εκτός αιχμής μειώνοντας, έτσι, και το κόστος φόρτισης.
- ♦ Επιτρέπει την χρήση μικρότερων ισχύων φορτιστών (60 kW ή 125 kW) σε αντίθεση με τους φορτιστές υψηλής ισχύος, οι οποίοι είναι συνήθως 500 kW, μειώνοντας περαιτέρω το κόστος φόρτισης.
- ♦ Δεν απαιτούνται, συνήθως, μισθώσεις ακινήτων γύρω από την περιοχή εξυπηρέτησης ή διαπραγματεύσεις.
- ♦ Δεν απαιτείται επιπλέον υποδομή φόρτισης εκτός από αυτή στο αμαξοστάσιο, καθώς τα λεωφορεία είναι ικανά να ολοκληρώσουν τα δρομολόγια μίας μέρας χωρίς να χρειαστούν επαναφόρτιση.
- ♦ Δεν επηρεάζεται το πρόγραμμα των δρομολογίων καθώς δεν απαιτείται επιπλέον χρόνος αναμονής στις στάσεις για την φόρτιση της μπαταρίας.

Ο τύπος κυψελών, στην συγκεκριμένη στρατηγική, που χρησιμοποιούνται στις μπαταρίες ιόντων – λιθίου είναι ο NMC ή ο LFP. Μερικά από τα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι:

- ♦ Η φόρτιση στο αμαξοστάσιο απαιτεί την εγκατάσταση μπαταριών μεγαλύτερης χωρητικότητας, όπως προαναφέρθηκε, σε σχέση με τις μπαταρίες που εγκαθίστανται στα λεωφορεία που φορτίζουν κατά μήκος της διαδρομής, ώστε να είναι σε θέση να ολοκληρώσουν τα δρομολόγια τους. Οι μεγαλύτερες μπαταρίες έχουν ως αποτέλεσμα και το αυξημένο βάρος των λεωφορείων, και κατά επέκταση την αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση και την μείωση του ωφέλιμου φορτίου του λεωφορείου.
- ♦ Όσο μεγαλύτερος είναι ο στόλος των ηλεκτρικών λεωφορείων, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας στο αμαξοστάσιο, κάτι που μπορεί να απαιτεί μία σημαντική επένδυση σε υποδομές από την τοπική επιχείρηση κοινής ωφέλειας και τον οργανισμό διαμετακόμισης. Τα πρακτορεία διαμετακόμισης έχουν συνηθίσει να έχουν την δυνατότητα να βάζουν οποιοδήποτε λεωφορείο σε οποιαδήποτε διαδρομή. Ένα λεωφορείο το οποίο φορτίζει μόνο στο αμαξοστάσιο, και άρα η χρέωση πραγματοποιείται μόνο εκεί, μπορεί να καταστήσει αδύνατο κάτι τέτοιο. Πρέπει να ληφθεί υπόψιν, προφανώς, η αυτονομία του λεωφορείου κατά την τοποθέτηση του σε μία διαδρομή. Αυτό μπορεί να απαιτεί, όμως, διαδρομές όπου να εξυπηρετούνται από ηλεκτρικά λεωφορεία και διαδρομές που να μην εξυπηρετούνται από αυτά, καθώς δεν αρκεί η αυτονομία τους.

- ♦ Η προσθήκη των ηλεκτρικών λεωφορείων και της απαραίτητης υποδομής σε ένα ήδη υπάρχον αμαξοστάσιο μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στην διανομή του ηλεκτρικού ρεύματος σε αυτό και μάλιστα, μπορεί να αποτελεί το ίδιο το αμαξοστάσιο τον περιοριστικό παράγοντα στην εφαρμογή αυτής της στρατηγικής. Η ζήτηση σε ηλεκτρικό ρεύμα είναι δυνατόν να είναι πολύ μεγαλύτερη – ανάλογα και με τον αριθμό των ηλεκτρικών λεωφορείων που θα προστεθούν στον στόλο – και να χρειαστεί αντικατάσταση ολόκληρου του συστήματος διανομής του ηλεκτρικού ρεύματος καθώς και των μετασχηματιστών που τροφοδοτούν το αμαξοστάσιο. Σε μία νέα σχεδίαση, βέβαια, είναι δυνατόν να διαμορφωθεί η ηλεκτρική υποδομή (διακόπτες και μετασχηματιστές) κατάλληλα ώστε, να είναι δυνατή η ανάπτυξη ενός τέτοιου δικτύου φόρτισης.
- ♦ Ένας φορτιστής ισχύος 125 kW εκπέμπει μεγάλα ποσά θερμότητας. Η προσθήκη, λοιπόν, πολλών φορτιστών παρόμοιας ισχύος στο αμαξοστάσιο μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στο σύστημα εξαερισμού του, οπότε είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψιν και αυτός ο παράγοντας και οι επιπτώσεις του στον εξαερισμό είτε πρόκειται για μία νέα κατασκευή είτε για εφαρμογή σε υπάρχον αμαξοστάσιο.

Η συγκεκριμένη στρατηγική φόρτισης, γενικά, προτιμάται για γραμμές ηλεκτρικών λεωφορείων που λειτουργούν σε ώρες αιχμής (πρωί και απόγευμα), καθώς τις υπόλοιπες ώρες τα λεωφορεία μπορούν να βρίσκονται στο αμαξοστάσιο και να φορτίζουν.

2.5.2: Φόρτιση στους Τερματικούς Σταθμούς & στο Αμαξοστάσιο

Προκειμένου, όμως, να αποφευχθεί η εγκατάσταση μεγάλου αριθμού φορτιστών στα αμαξοστάσια αλλά, και να αυξηθεί η διαθεσιμότητα των λεωφορείων στην διάρκεια εκτέλεσης των δρομολογίων, εφαρμόζεται η δεύτερη στρατηγική φόρτισης. Σύμφωνα με αυτή, μία ή δύο φορές την εβδομάδα, για εξισορρόπηση της μπαταρίας και επαναφορά της χωρητικότητας, πραγματοποιείται μία νυχτερινή φόρτιση στα άκρα της διαδρομής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθεί ο κύκλος ζωής της μπαταρίας και η ανθεκτικότητά της, αλλά και να επιμηκυνθεί η απόσταση που καλύπτει καθημερινά το λεωφορείο. Η στρατηγική αυτή χρησιμοποιεί μπαταρίες με κυψέλες τύπου NMC, LFP αλλά, και LTO.

Οι μπαταρίες μικρής χωρητικότητας, μπορούν, ωστόσο, να έχουν περισσότερους κύκλους ζωής σε σχέση με τις μπαταρίες μεγάλης χωρητικότητας, κάτι που μπορεί να οδηγήσει στο να μην απαιτείται καθόλου ολονύχτια φόρτιση. Το λεωφορείο θα φορτίζεται μόνο στα άκρα της διαδρομής. Υπάρχει πιθανότητα να υφίστανται φορτιστές στα αμαξοστάσια αλλά, κάτι τέτοιο θα εξυπηρετεί σκοπούς συντήρησης της μπαταρίας. Οι μπαταρίες ιόντων - λιθίου που είναι δυνατόν να αξιοποιηθούν για τον συγκεκριμένο τρόπο φόρτισης μπορούν να χρησιμοποιούν κυψέλες τύπου LTO.

2.5.3: Φόρτιση στα Άκρα της Διαδρομής και στις Ενδιάμεσες Στάσεις

Η τελευταία στρατηγική φόρτισης μπορεί να αξιοποιηθεί μόνο όταν οι μπαταρίες ιόντων - λιθίου που είναι εγκατεστημένες στο ηλεκτρικό λεωφορείο χρησιμοποιούν κυψέλες τύπου LIC. Οι συγκεκριμένες κυψέλες έχουν πολύ μικρή χωρητικότητα, τέτοια, που το λεωφορείο

θα χρειαστεί να φορτίζεται κάθε λίγα χιλιόμετρα. Είναι δυνατόν, επίσης, να χρησιμοποιηθούν και κυψέλες τύπου LTO, οι οποίες θα μειώσουν το ρυθμό αποφόρτισης της μπαταρίας και θα αυξήσει την διάρκεια ζωής της. Η φόρτιση, λοιπόν, κατά μήκος μίας διαδρομής απαιτεί την εγκατάσταση φορτιστών υψηλής ισχύος σε συγκεκριμένες τοποθεσίες – ενδιάμεσες στάσεις – κατά την διάρκεια αποβίβασης και επιβίβασης των επιβατών.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα της στρατηγικής αυτής είναι τα εξής:

- ♦ Η φόρτιση κατά μήκος της διαδρομής επιτρέπει την εγκατάσταση μπαταριών μικρότερης χωρητικότητας, όπως προαναφέρθηκε, και επιτρέπει στο ηλεκτρικό λεωφορείο να καλύπτει μεγαλύτερες αποστάσεις σε σχέση με ένα σύστημα φόρτισης αποκλειστικά στο αμαξοστάσιο.
- ♦ Οποιοδήποτε ηλεκτρικό λεωφορείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε διαδρομή, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει επαρκής αριθμός φορτιστών κατά μήκος των διαδρομών.

Ορισμένα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι τα παρακάτω:

- ♦ Η φόρτιση κατά μήκος της διαδρομής είναι πιο ακριβή μέθοδος. Μία τυπική εγκατάσταση ενός φορτιστή 500 kW και της σχετικής υποδομής μπορεί να κοστίσει περίπου 1.000.000 δολάρια σε αστικό περιβάλλον, σύμφωνα με την *Wendel Companies*.
- ♦ Η τοποθέτηση σταθμών φόρτισης σε μία περιορισμένης έκτασης αστική περιοχή μπορεί να είναι δύσκολη, λόγω των περιορισμών χώρου και ιδιοκτησίας.
- ♦ Η φόρτιση κατά μήκος της διαδρομής είναι ο πιο ακριβός τρόπος φόρτισης ενός ηλεκτρικού λεωφορείου εάν υπάρχουν χρεώσεις ζήτησης και ο ρυθμός φόρτισης δεν είναι αυτός ενός ηλεκτρικού οχήματος.
- ♦ Η μέθοδος αυτή απαιτεί επιπλέον εξοπλισμό τόσο στο λεωφορείο όσο και στην θέση όπου θα τοποθετηθεί ο φορτιστής, ο οποίος απαιτεί συντήρηση, η οποία καθίσταται όλο και πιο δύσκολη σε ψυχρά κλίματα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά και οι τέσσερις στρατηγικές φόρτισης των μπαταριών ιόντων – λιθίου σε ένα ηλεκτρικό λεωφορείο, καθώς και ο τύπος κυψελών που πρέπει να χρησιμοποιούνται σε αυτές, προκειμένου να είναι δυνατόν να εξυπηρετηθεί η εκάστοτε στρατηγική:

Στρατηγική Φόρτισης	Τύπος Κυψελών
Στρατηγική 1	NMC, LFP
Στρατηγική 2	NMC, LFP
Στρατηγική 3	LTO
Στρατηγική 4	LTO, LIC

Στις δημόσιες συγκοινωνίες, λοιπόν, ο αριθμός των μεταφερόμενων επιβατών και η απόσταση στην οποία επιθυμούν να μεταφερθούν είναι από τους πιο κρίσιμους συντελεστές. Οι διαδρομές σε ένα δίκτυο αστικών συγκοινωνιών διαφέρουν μεταξύ τους τόσο ως προς την μορφολογία του εδάφους, τον αριθμό και την απόσταση μεταξύ των

στάσεων, όσο και ως προς τον αριθμό των φωτεινών σηματοδοτών. Όλες αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας ανά χιλιόμετρο (kWh/km) και ανά επιβάτη, και την επιλογή των μπαταριών για το ηλεκτρικό λεωφορείο. Ένα ηλεκτρικό λεωφορείο σταθερού μεγέθους έχει μεγαλύτερη μάζα και μικρότερη αυτονομία σε σχέση με ένα λεωφορείο με κινητήρα εσωτερικής καύσης – ντίζελ, κάτι που όπως προαναφέρθηκε, έχει ως αποτέλεσμα την μεταφορά λιγότερων επιβατών χωρίς την αύξηση του συνολικού βάρους του λεωφορείου. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με την εγκατάσταση μικρότερου αριθμού και λιγότερου βάρους μπαταριών. Το αποτέλεσμα αυτού θα είναι η δυνατότητα μεταφοράς μεγαλύτερου αριθμού επιβατών αλλά, η απόσταση που θα είναι ικανό να διανύσει το ηλεκτρικό λεωφορείο υπό μία μόνο φόρτιση θα είναι μικρότερη. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των επιβατών, η μπαταρία θα είναι μικρότερη και ο αριθμός των κύκλων φόρτισης και αποφόρτισης θα είναι υψηλότερος. Μέχρι τώρα τα ηλεκτρικά λεωφορεία είναι εξοπλισμένα κυρίως με μπαταρίες ιόντων – λιθίου με κυψέλες τύπου NMC και LTO, αλλά και με LFP. Βέβαια, η τάση να εγκαταλειφθούν οι μπαταρίες με κυψέλες LFP μεγαλώνει όλο και περισσότερο. Παρά την καλύτερη ηλεκτρική απόδοση και την ασφάλεια που προσφέρει ο συγκεκριμένος τύπος, σταδιακά αντικαθίσταται από μπαταρίες με κυψέλες NMC, επειδή ο τύπος κυψελών LFP έχει σημαντικά μεγαλύτερη μάζα με λιγότερη χωρητικότητα. Από οικονομικής πλευράς, γενικά οι μπαταρίες ιόντων – λιθίου, η τιμή των κυψελών είναι μικρότερη όσο πιο μεγάλη είναι η ενέργεια που προσφέρουν.

2.5.4: Η Στρατηγική της Ευκαιριακής Φόρτισης (Opportunity Charging Strategy)

Η συγκεκριμένη στρατηγική φόρτισης έχει αποδειχθεί αρκετά αποδοτική για την εξυπηρέτηση των ηλεκτρικών λεωφορείων σε δίκτυα αστικών συγκοινωνιών. Η ευκαιριακή φόρτιση αναφέρεται στην αξιοποίηση του χρόνου παραμονής του λεωφορείου στην στάση για την επιβίβαση – αποβίβαση, προκειμένου να φορτιστούν οι μπαταρίες του. Οι *Zhiming Gao et al (2017)* προσομοίωσαν και αξιολόγησαν την κατανάλωση ενέργειας και την απόδοση της μπαταρίας για τα ηλεκτρικά λεωφορεία σε πραγματικές διαδρομές ηλεκτρικών λεωφορείων. Αναλύθηκαν διάφοροι φορτιστές προκειμένου να διερευνηθεί η ικανότητα διατήρησης της αξιοπιστίας όπως τα συμβατικά λεωφορεία. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συχνή και μικρή διάρκεια ευκαιριακή φόρτιση μπορεί να εξαλείψει τις καθυστερήσεις στα δρομολόγια. Η μελέτη κατέληξε στο ότι ο υποβιβασμός της μπαταρίας με την χρήση φορτιστών υψηλής ισχύος δεν φαίνεται να είναι πιο σημαντικός από ότι η κανονική επαναλαμβανόμενη φόρτιση με την πάροδο του χρόνου. Οι ισχύς φόρτισης που χρησιμοποιούνται για την φόρτιση των ηλεκτρικών λεωφορείων έχουν απόδοση περίπου 97%, κάτι που οφείλεται στις υψηλές τάσεις που απαιτούνται για τέτοιου είδους σταθμούς φόρτισης. Ένας σταθμός φόρτισης ηλεκτρικού λεωφορείου μπορεί να λειτουργεί με τάσεις που κυμαίνονται από 600 έως 750 V, οι οποίες είναι υψηλές εάν συγκριθούν με τις τάσεις που χρησιμοποιούνται για την φόρτιση των επιβατικών αυτοκινήτων, οι οποίες κυμαίνονται από 120 – 240 V. Μία υψηλή τάση δίνει χαμηλότερες απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας και επομένως, υψηλότερη απόδοση. Ως προς την κατανάλωση ενέργειας η μελέτη διαπίστωσε ότι ένα ηλεκτρικό λεωφορείο 12 – 18 μέτρα με έναν συγκεκριμένο κύκλο οδήγησης έχει μία κατανάλωση που κυμαίνεται μεταξύ 1.24 – 2.48 kWh/km. Σε σύγκριση με ένα συμβατικό λεωφορείο η τιμή αυτή είναι χαμηλότερη καθώς στο τελευταίο κυμαίνεται από 1.7 – 3.3 kWh/km.

Η ABB, πολυεθνική εταιρεία που παρέχει τεχνολογίες ενέργειας και αυτοματισμού, υποστηρίζει ότι η ευκαιριακή φόρτιση δίνει την δυνατότητα λειτουργίας των ηλεκτρικών λεωφορείων 24/7. Με την στρατηγική αυτή είναι δυνατόν να εξαλειφθεί η ανάγκη για επιπλέον λεωφορεία, καθώς τα λεωφορεία με μπαταρίες μεγάλης χωρητικότητας απαιτούν μεγαλύτερο χρόνο φόρτισης και άρα υπάρχει περίπτωση να επηρεάζουν αρνητικά το πρόγραμμα των δρομολογίων. Προκειμένου, λοιπόν, να μην επηρεαστεί ο προγραμματισμός των δρομολογίων από τον χρόνο φόρτισης όταν επιλέγονται μπαταρίες μεγάλης χωρητικότητας, μπορεί να χρειαστεί να εισαχθούν επιπλέον λεωφορεία. Οι μπαταρίες μικρότερης χωρητικότητας που χρησιμοποιούνται συνήθως για ευκαιριακή φόρτιση, προσφέρουν, πέραν του μικρότερου χρόνου φόρτισης και της μη επιβάρυνσης του στόλου και των δρομολογίων, και την δυνατότητα μεταφοράς περισσότερων επιβατών, αφού οι μπαταρίες καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο, και μειώνουν κατ' επέκταση το συνολικό βάρος του λεωφορείου μειώνοντας, έτσι, και την κατανάλωση ενέργειας αυτού.

2.5.4.1: Φόρτιση στα Άκρα της Διαδρομής (End – Stop Charging)

Σε αυτή τη μέθοδο οι φορτιστές μπορούν να τοποθετηθούν στις αρχικές ή στις τελικές στάσεις μία διαδρομής ηλεκτρικού λεωφορείου, εκμεταλλευόμενοι τον χρόνο παραμονής που διατίθεται σε αυτές μεταξύ της λήξης του εκάστοτε τρέχοντος και της έναρξης του επόμενου δρομολογίου για την φόρτιση των μπαταριών (Rogge et al. 2015). Η χωρητικότητα της μπαταρίας σε αυτή την περίπτωση πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε, να μην δημιουργηθεί πρόβλημα στην περίπτωση που χαθεί μία φόρτιση πριν την έναρξη του επόμενου δρομολογίου και να εξαντληθεί η ενέργεια που έχει απομείνει κατά την διάρκεια εκτέλεσης του δρομολογίου, η οποία ενέργεια εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες κυκλοφορίας που επικρατούν. Στη μέθοδο αυτή πρέπει να ληφθεί υπόψιν ο αντίκτυπος που ενδέχεται να έχει στο πρόγραμμα των λεωφορείων. Με άλλα λόγια, πρέπει να υπάρχει αρκετός χρόνος σε κάθε σημείο φόρτισης ώστε να μην προκύπτουν καθυστερήσεις στις αναχωρήσεις. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μάλιστα, μπορεί να απαιτηθεί επιπλέον χρόνος για την φόρτιση των μπαταριών σε σύγκριση με τον χρόνο προηγούμενης φόρτισης. Το κόστος της μπαταρίας στην στρατηγική αυτή είναι χαμηλότερο σε σύγκριση με την φόρτιση στο αμαξοστάσιο λόγω της μικρότερης χωρητικότητας που απαιτείται ενώ, το κόστος της υποδομής είναι υψηλότερο λόγω της ανάγκης για αρκετούς και γρήγορους φορτιστές. Αξίζει να σημειωθεί, ότι αυτός ο τρόπος φόρτισης μπορεί να συνδυαστεί με την φόρτιση στο αμαξοστάσιο αλλά και με την ευκαιριακή φόρτιση, για ένα οικονομικά αποδοτικό σύστημα.

2.5.4.2: Φόρτιση Κατά Μήκος της Διαδρομής (Along the Route Charging)

Η στρατηγική αυτή αναφέρεται στην χρήση μίας ή περισσότερων ενδιάμεσων στάσεων κατά μήκος της διαδρομής ενός ηλεκτρικού λεωφορείου για εγκατάσταση φορτιστών με σκοπό την φόρτιση των μπαταριών αυτού. Η χωρητικότητα της μπαταρίας με την εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι η χαμηλότερη σε σύγκριση με τις προαναφερθείσες μεθόδους, μειώνοντας σημαντικά το κόστος της μπαταρίας. Από την άλλη πλευρά, το κόστος της υποδομής είναι το υψηλότερο εν συγκρίσει με τις υπόλοιπες στρατηγικές καθώς, χρειάζονται αρκετοί φορτιστές ανά διαδρομή ηλεκτρικού λεωφορείου έτσι, ώστε να παρέχεται αρκετή ενέργεια για να βγαίνουν εις πέρας οι καθημερινές λειτουργίες. Επίσης, πρέπει να εξεταστεί

η διαθεσιμότητα του χώρου που μελετάται γιατί, σε πυκνές κατοικημένες περιοχές μπορεί να μην υπάρχει η δυνατότητα εγκατάστασης φορτιστών. Οι απαιτήσεις, ακόμη, σε ενέργεια στα σημεία φόρτισης είναι υψηλές, οπότε και χρειάζεται ιδιαίτερος χειρισμός του ηλεκτρικού δικτύου για να μπορεί να αντέχει ανάλογα ποσά ενέργειας. Αυτό το ζήτημα, βέβαια, υφίσταται και στην στρατηγική φόρτισης στο τέρμα – αρχή κάθε διαδρομής, εάν αυτές οι στάσεις βρίσκονται στο κέντρο της πόλης.

2.6: Τεχνολογίες Φόρτισης Ηλεκτρικών Λεωφορείων.

Οι τεχνικές φόρτισης των μπαταριών των ηλεκτρικών λεωφορείων είναι διάφορες αλλά, οι δύο κύριες επιλογές είναι οι παρακάτω:

1. Στατική φόρτιση του λεωφορείου.
2. Δυναμική φόρτιση του λεωφορείου.

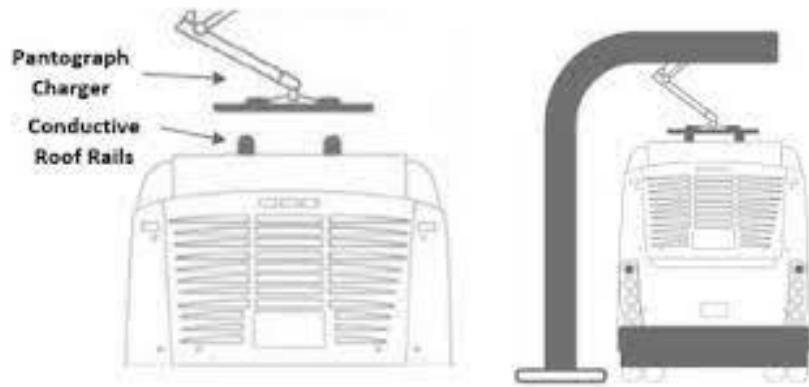
Η πρώτη επιλογή αναφέρεται στην φόρτιση του ηλεκτρικού λεωφορείου όντας ακίνητο. Για παράδειγμα, όταν ένα λεωφορείο περιμένει σε μία στάση για την αποβίβαση και επιβίβαση ή όταν είναι σταθμευμένο στο αμαξοστάσιο. Η δεύτερη επιλογή αναφέρεται στην φόρτιση του εν κινήσει. Στην συγκεκριμένη εργασία μελετάται η χωροθέτηση φορτιστών ηλεκτρικών λεωφορείων σε στάσεις (ενδιάμεσες και τερματικές) διαδρομών συγκεκριμένου δικτύου, οπότε δεν θα γίνει περιγραφή των τρόπων δυναμικής φόρτισης αυτού. Οι δύο πιο συνηθισμένοι τρόποι στατικής φόρτισης, λοιπόν, που θα αναλυθούν είναι οι εξής:

1. Η αγώγιμη φόρτιση και
2. Η επαγωγική φόρτιση.

Παρακάτω θα γίνει μία σύντομη αναφορά στην κάθε τεχνολογία φόρτισης.

2.6.1: Αγώγιμη Φόρτιση

Η αγώγιμη φόρτιση βασίζεται στην μεταφορά ενέργειας σε ηλεκτρικά οχήματα με άμεση ηλεκτρική επαφή. Η πιο κοντινή λύση για την εφαρμογή της μεθόδου της αγώγιμης φόρτισης για την φόρτιση των μπαταριών των ηλεκτρικών λεωφορείων είναι η χρήση των παντογράφων. Ο παντογράφος είναι μία συσκευή τοποθετημένη στην οροφή ενός ηλεκτρικού λεωφορείου για την συλλογή της ισχύος μέσω επαφής με καλώδια και είναι παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιούνται εδώ και δεκαετίες για την φόρτιση των τρένων και των τραμ. Ο όρος παντογράφος, μάλιστα, πηγάζει από την ομοιότητα ορισμένων μορφών παντογράφων με τους μηχανικούς παντογράφους, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την αντιγραφή χειρόγραφων κειμένων και σχεδίων. Στην περίπτωση των ηλεκτρικών λεωφορείων υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι αγώγιμων φορτιστών, ανάλογα με το που βρίσκεται ο παντογράφος. Στον έναν τύπο ο παντογράφος βρίσκεται ενσωματωμένος στην οροφή του λεωφορείου και έρχεται σε επαφή με το εναέριο σύστημα τροφοδοσίας, το οποίο βρίσκεται τοποθετημένο στον εκάστοτε σταθμό φόρτισης. Ο άλλος τύπος φέρει τον παντογράφο εγκατεστημένο στο εναέριο σύστημα τροφοδοσίας, οπότε και απαιτείται μόνο ένα σύστημα επαφής στο λεωφορείο, μειώνοντας έτσι το συνολικό κόστος της υποδομής αλλά, και το βάρος του λεωφορείου. Η διαδικασία κατά την οποία ο παντογράφος εκτείνεται προκειμένου να επιτευχθεί η ηλεκτρική επαφή διαρκεί μερικά δευτερόλεπτα.



Σχήμα 17: Φόρτιση ηλεκτρικού λεωφορείου με παντογράφο (<https://www.globalelectricity.org/>)

Τα αγώγιμα συστήματα δίνουν την δυνατότητα μεταφοράς υψηλής ισχύος, καλύπτοντας ένα εύρος από 100 έως 450 kW ενώ, ταυτόχρονα, πραγματοποιούνται και δοκιμές αγώγιμης φόρτισης με φορτιστές 600 kW (ABB, 2017a). Χάρη σε αυτά τα επίπεδα ισχύος καθίσταται δυνατή η πλήρης φόρτιση ενός ηλεκτρικού λεωφορείου σε μόλις 4 έως 10 λεπτά (ABB, 2017a, Siemens, 2015, Volvo, 2017). Οι φορτιστές προσφέρονται από διάφορες εταιρείες ανά τον κόσμο, όπως είναι η ABB, η Siemens και η Ogrid.

Η ABB, μάλιστα, προσφέρει μία ιδανική λύση φόρτισης με παντογράφο σύμφωνα με το πρωτόκολλο OppCharge (Opportunity Charge). Με τυπικούς χρόνους φόρτισης από 3 έως 6 λεπτά, το σύστημα του παντογράφου μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί στην δημόσια συγκοινωνία, διασφαλίζοντας, έτσι, ένα δίκτυο δημόσιων μεταφορών με ηλεκτρικά λεωφορεία μηδενικών εκπομπών ρύπων κατά την διάρκεια της λειτουργίας τους, χωρίς να επηρεάζεται η κανονική λειτουργία της διαδρομής.

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται το σύστημα της αγώγιμης φόρτισης με παντογράφο σε πραγματικές συνθήκες:



Σχήμα 18: Αγώγιμη φόρτιση ηλεκτρικού λεωφορείου με παντογράφο – 1 (<https://new.abb.com/>)



Σχήμα 19: Αγωγή φόρτιση BEB με παντογράφο – 2
[\(https://www.linkedin.com/pulse/sustainable-public-transport/\)](https://www.linkedin.com/pulse/sustainable-public-transport/)

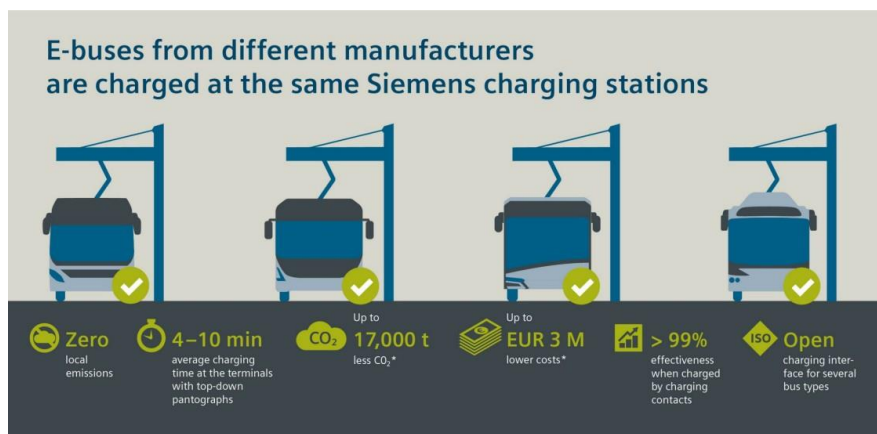


Σχήμα 20: Αγωγή φόρτιση BEB με παντογράφο – 3
[\(https://www.sustainable-bus.com/\)](https://www.sustainable-bus.com/)

2.6.1.1: Τα Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Αγωγίμης Φόρτισης

Τα κύρια πλεονεκτήματα είναι τα εξής:

- ♦ Η γρήγορη φόρτιση με ένα ευρύ φάσμα ισχύος για την κάλυψη των αναγκών φόρτισης που ταιριάζουν καλύτερα στο εκάστοτε πρόγραμμα.
- ♦ Η δυνατότητα υψηλού χρόνου λειτουργίας, χάρη στο στιβαρό σχεδιασμό, τα εργαλεία διαχείρισης.
- ♦ Η δυνατότητα φόρτισης διαφορετικών μοντέλων λεωφορείων με τον ίδιο φορτιστή, ακολουθώντας τα διεθνή πρότυπα.
- ♦ Τα καλά επίπεδα απόδοσης και η χαμηλότερη έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία σε σύγκριση με τα επαγωγικά συστήματα φόρτισης.



Σχήμα 21: Πλεονεκτήματα της αγωγίμης φόρτισης [\(https://twitter.com/siemensmobility/status\)](https://twitter.com/siemensmobility/status)

Τα μειονεκτήματα περιορίζονται:

- ♦ Στο υψηλό κόστος συντήρησης λόγω της επαφής που γίνεται μεταξύ αγωγού και συλλέκτη.
- ♦ Στο κομμάτι της αισθητικής λόγω του μεγέθους.
- ♦ Στην έκθεση στις εξωτερικές συνθήκες περιβάλλοντος.
- ♦ Στην πιθανή μερική καταστροφή που μπορεί να υποστούν λόγω της αυτής της έκθεσης.

2.6.2: Η Επαγωγική Φόρτιση

Η μέθοδος της επαγωγικής φόρτισης αναφέρεται στους φορτιστές εκείνους οι οποίοι μεταφέρουν ενέργεια μέσω μαγνητικών πεδίων (*Bombardier Primove, 2017c*). Αυτοί οι φορτιστές χρησιμοποιούν δύο πηνία (πηνίο μετάδοσης και πηνίο λήψης) που τοποθετούνται το ένα δίπλα στο άλλο μεταφέροντας την ενέργεια. Το ένα από τα πηνία βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του δρόμου και το άλλο βρίσκεται στο κάτω μέρος του οχήματος. Το εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής συχνότητας δημιουργείται στο πηνίο μετάδοσης, το οποίο μεταφέρει επαγωγικά την ισχύ στο πηνίο του δέκτη. Επειδή δεν υπάρχει κάποια επαφή μεταξύ των πηνίων, το κενό μεταξύ αυτών θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο για να επιτυγχάνεται μείωση των απωλειών. Ορισμένες εταιρείες παρέχουν ήδη επαγωγικές λύσεις φόρτισης έως 200 kW για ηλεκτρικά λεωφορεία, όπως το σύστημα Primove, το οποίο κατασκευάστηκε από την εταιρεία Bombardier Primove GmbH.



Σχήμα 22: Επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικού λεωφορείου – 1 (<https://www.urban-transport-magazine.com/>)



Σχήμα 23: Επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικού λεωφορείου – 2 (<https://automotive-exports.com/>)

2.6.2.1: Τα Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Επαγωγικής Φόρτισης

Τα κύρια πλεονεκτήματα είναι τα εξής:

- ♦ Οι επαγωγικοί φορτιστές μειώνουν σημαντικά τον χρόνο που απαιτείται για την έναρξη της φόρτισης σε σύγκριση με τους αγώγιμους φορτιστές, καθώς το σύστημα Bombardier Primove χρειάζεται μόλις λίγα δευτερόλεπτα.
- ♦ Στο μεγαλύτερο μέρος της υποδομής οι επαγωγικοί φορτιστές βρίσκονται υπόγεια, μειώνοντας σημαντικά την οπτική επίδραση, την πιθανότητα να υποστούν ζημιές και την έκθεση στις εξωτερικές συνθήκες περιβάλλοντος.
- ♦ Ενδέχεται οι επαγωγικοί φορτιστές να καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο σε σύγκριση με τους αγώγιμους φορτιστές (Xylia et al., 2017).

Τα μειονεκτήματα της επαγωγικής φόρτισης είναι:

- ♦ Το γεγονός ότι δεν έχει ωριμάσει η ιδέα αυτής της μεθόδου φόρτισης στο ίδιο επίπεδο με την μέθοδο της αγώγιμης φόρτισης.
- ♦ Η ανησυχία που προκαλεί η χρήση των μαγνητικών πεδίων για την μεταφορά της ισχύος.
- ♦ Η ανάγκη για εκτεταμένο σκάψιμο η οποία συνεπάγεται αυξημένες δυσκολίες και χρόνους κατασκευής.

2.7: Ηλεκτροκίνηση και Ελλάδα

Η ηλεκτροκίνηση σε όλη την Ευρώπη, όπως και στην Ελλάδα, «κολλάει» στα σημεία φόρτισης. Η Ελλάδα, συγκεκριμένα, όσον αφορά τις υποδομές φόρτισης για τα ηλεκτρικά

οχήματα, βρίσκεται στις τελευταίες θέσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όπως προκύπτει από έρευνα του Ευρωπαϊκού Ελεγκτικού Συνεδρίου. Με βάση, επίσης, στοιχεία της Eurostat, τον Σεπτέμβριο του έτους 2020 η Ελλάδα είναι η τρίτη χώρα από το τέλος στους σταθμούς φόρτισης ανά 100 τετραγωνικά χιλιόμετρα. Σήμερα, λειτουργούν στην Ελλάδα περίπου 150 δημόσια προσβάσιμα σημεία φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων, γεγονός που εξηγείται από την χαμηλή ζήτηση που υπήρχε τα τελευταία χρόνια, καθώς έως και το 2019 η ηλεκτροκίνηση παρουσίαζε εξαιρετικά χαμηλή διείσδυση, με μόλις 1300 ηλεκτρικά οχήματα ταξινομημένα. Με αυτή την αργή, λοιπόν, διείσδυση στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα στην Ελλάδα, δεν είναι παράξενο το γεγονός ότι η θέση της όσον αφορά την αγορά της ηλεκτροκίνησης στα ηλεκτρικά λεωφορεία δεν είναι ιδιαίτερα ευνοϊκή. Μάλιστα, μία τέτοια επένδυση έχει και πολύ μεγαλύτερο κόστος και χρήζει παρουσίας οικονομικών κινήτρων και πολλών άλλων παραγόντων ώστε, η ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης στα μέσα μεταφοράς, και δει στα αστικά λεωφορεία, να προωθηθεί ουσιαστικά. Η μετάβαση στην ηλεκτροκίνηση αποτελεί στρατηγική επιλογή για την Ευρώπη και την Ελλάδα για λόγους περιβάλλοντος, ανταγωνιστικότητας, μείωσης της εξάρτησης από εισαγόμενα καύσιμα και του υψηλού κόστους συντήρησης των αστικών λεωφορείων με κινητήρες εσωτερικής καύσης.

2.7.1: Μετάβαση σε ένα Πράσινο και Βιώσιμο Σύστημα Μεταφορών

Η εικόνα για την ηλεκτροκίνηση στην Ελλάδα αρχίζει, τα τελευταία χρόνια, να αλλάζει και να γίνονται προσπάθειες για την μετάβαση σε ένα πράσινο και βιώσιμο σύστημα συγκοινωνιών με την προώθηση ενεργειών που αφορούν την αντικατάσταση μέρους του στόλου των αστικών συγκοινωνιών τόσο σε Αθήνα, όσο και στην Θεσσαλονίκη. Συγκεκριμένα, η προώθηση της ηλεκτροκίνησης μέσω της αγοράς ηλεκτρικών λεωφορείων αποτελεί μία επένδυση που περιλαμβάνεται στο Εθνικό Σχέδιο Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας “Ελλάδα 2.0”. Μεταξύ άλλων επενδυτικών δράσεων και μεταρρυθμίσεων που περιλαμβάνονται στο Σχέδιο, θα επενδυθεί το ποσό των 220 εκατομμυρίων ευρώ για την *Ηλεκτροκίνηση Συγκοινωνιών*.

2.7.2: Τα Ηλεκτρικά Λεωφορεία στην Αθήνα

2.7.2.1: Το BYD Midi Bus

Η πρώτη φορά που η ΟΣΥ (Οδικές Συγκοινωνίες) προχώρησε στην δοκιμή ενός ηλεκτρικού λεωφορείου στους δρόμους της Αθήνας σημειώθηκε τον Απρίλιο του έτους 2019. Πρόκειται για το ηλεκτρικό λεωφορείο της κινεζικής εταιρείας BYD, και συγκεκριμένα το BYD Midi Bus. Έχει μήκος 8.7 m, με μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα και με δυνατότητα μεταφοράς 58 επιβατών, από τους οποίους οι 22 είναι καθήμενοι. Με αμάξωμα κατασκευασμένο από αλουμίνιο, ηλεκτροκινητήρες στις πλήμνες των τροχών με ισχύ 180 (2 x 90) kW (250 ίπποι), ροπή 350 Nm, άμεσα διαθέσιμη από το ξεκίνημα του λεωφορείου, και με δύο μόνο ώρες χρόνο φόρτισης μπαταριών το αστικό ηλεκτρικό BYD, έχει τη δυνατότητα να καλύψει μέχρι και 200 χιλιόμετρα, περίπου, χωρίς επαναφόρτιση. Αξίζει να σημειωθεί, ότι στην περίπτωση του λεωφορείου αυτού υπάρχει η δυνατότητα εκτέλεσης των δρομολογίων μίας ολόκληρης βάρδιας, απαλλάσσοντας έτσι τον συγκοινωνιακό φορέα από την εγκατάσταση επιπλέον

φορτιστών στις αφετηρίες ή σε άλλα σημεία για την επαναφόρτιση των μπαταριών, μια υποδομή που αυξάνει σημαντικά το κόστος λειτουργίας του στόλου. Στο σημείο αυτό, να σημειωθεί, ότι το «αναγεννητικό» σύστημα των φρένων – regenerative braking – μετατρέπει ένα μέρος της κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική, την οποία αποθηκεύει στις μπαταρίες συμβάλλοντας έτσι στην αύξηση της ακτίνας λειτουργίας του λεωφορείου.



Σχήμα 24: Το BYD Midi Bus – 1 (<https://www.athenstransport.com/>)



Σχήμα 25: Το BYD Midi Bus – 2 (<https://www.athenstransport.com/>)

2.7.2.2: Το BYD K9

Επίσης, η παραπάνω περίπτωση δεν είναι μοναδική, καθώς έχει κινηθεί στους δρόμους της Αθήνας και άλλο ηλεκτρικό λεωφορείο της ίδια μάρκας. Πρόκειται για το μοντέλο K9 της κινεζικής μάρκας BYD. Συγκεκριμένα, το Φεβρουάριο του 2021 πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικά δρομολόγια - στο πλαίσιο των δοκιμαστικών διαδρομών του Υπουργείου Μεταφορών ενόψει του διαγωνισμού για προμήθεια 1.300 λεωφορείων σε Αθήνα και Θεσσαλονίκη.



Σχήμα 26: Το BYD K9 – 1 (<https://www.athenstransport.com/>)

Το εν λόγω δοκιμαστικό λεωφορείο κινέζικης τεχνολογίας έχει μήκος 12 μέτρα, 3 διπλές πόρτες χωρίς σκαλοπάτια εισόδου και η χωρητικότητά του σε επιβάτες είναι 24 καθήμενοι, 51 όρθιοι και 1 ΑμΕΑ. Διαθέτει ράμπα για ΑμΕΑ και η μπαταρία του είναι χωρητικότητας 348 kW. Διαθέτει, επίσης, 2 ηλεκτρικά μοτέρ ισχύος 150 kW έκαστο, τα οποία αντιστοιχούν σε ισχύ 402 hp, Wi-Fi συνδεσιμότητα για τους επιβάτες και USB φορτιστές για την φόρτιση των κινητών τηλεφώνων των επιβατών. Να σημειωθεί, ότι είχαν προηγηθεί το Σεπτέμβριο του 2020 δοκιμαστικά δρομολόγια του ίδιου μοντέλου, στα οποία αντί για επιβάτες χρησιμοποιούνταν βάρη, προκειμένου να προσομοιωθούν οι συνθήκες κανονικής κυκλοφορίας.. Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζεται το ηλεκτρικό λεωφορείο BYD K9 στους δρόμους της Αθήνας στην διάρκεια των πρώτων δοκιμών του:



Σχήμα 27: Το BYD K9 – 2 (<https://www.athenstransport.com/>)



Σχήμα 28: Το BYD K9 – 3 (<https://www.athenstransport.com/>)

2.7.2.3: Το Yutong U12

Στις παραπάνω προσπάθειες και δοκιμές προστίθεται και το ηλεκτροκίνητο λεωφορείο της κινεζικής εταιρείας Yutong. Το λεωφορείο που απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα είναι το μοντέλο U12 της σειράς ηλεκτρικών λεωφορείων της Yutong. Πρόκειται για ένα μοντέλο χαμηλού δαπέδου χωρίς σκαλοπάτια εισόδου, έχει μήκος 12m, 3 διπλές πόρτες, διαθέτει ράμπα για ΑμΕΑ και η χωρητικότητά του ανέρχεται σε 27 καθήμενους επιβάτες, 46 όρθιους και 1 ΑμΕΑ.



Σχήμα 29: Το Yutong U12 – 1 (<https://www.alamy.com/>)

Το λεωφορείο διαθέτει κινητήρα ισχύος 350 kW, με ροπή 1200 Nm, ενώ η χωρητικότητα της μπαταρίας του είναι συνολικά 350 kWh. Αξίζει, να αναφερθεί, ότι τα συγκεκριμένα ηλεκτρικά

λεωφορεία της κινέζικης αυτοκινητοβιομηχανίας Yutong κυκλοφορούν σε 322 πόλεις στον κόσμο ανάμεσα στις οποίες είναι και πολλές ευρωπαϊκές.



Σχήμα 30: To Yutong U12 – 2 (<https://www.alamy.com/>)

2.7.2.4: To Solaris Urbino 12 Electric

Ακόμη ένα παράδειγμα της προσπάθειας ένταξης της ηλεκτροκίνησης στις συγκοινωνίες της Αθήνας αποτελεί η παραχώρηση από την SOLARIS Hellas A.E., θυγατρική της κατασκευάστριας εταιρείας SOLARIS Bus & Coach, ενός καινούργιου ηλεκτροκίνητου λεωφορείου Urbino 12 Electric, το οποίο ανήκει στην κατηγορία των μοντέλων χαμηλού δαπέδου μήκους 12 m , προκειμένου να διεξαχθούν δοκιμές σε δρομολόγια με επιβάτες εντός του αστικού ιστού Αθηνών και συγκεκριμένα στην γραμμή Παγκράτι – Κυψέλη.



Σχήμα 31: To Solaris Urbino 12 Electric – 1 (<https://www.youtruck.gr/>)

Πρόκειται για ένα εξαιρετικά αθόρυβο λεωφορείο, με μηδενικές εκπομπές ρύπων, μοντέρνο σχεδιασμό και φυσικά χαμηλό λειτουργικό κόστος. Στόχος είναι το λεωφορείο να προσφέρει τις μέγιστες δυνατές επιχειρησιακές δυνατότητες και απόλυτη προσαρμογή στο προφίλ του δρομολογίου. Επιπλέον, η προσεκτική επιλογή των εξαρτημάτων και του εξοπλισμού μειώνει το κόστος αγοράς, αφού το λεωφορείο φέρει κάθε φορά ακριβώς όσα χαρακτηριστικά απαιτεί το μεταφορικό έργο που θα εκτελεί. Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας του λεωφορείου αποτελείται από πέντε (5) συστοιχίες μπαταριών ιόντων – λιθίου, με συνολική χωρητικότητα στις 400 kWh. Την κίνηση του λεωφορείου αναλαμβάνουν δύο ηλεκτροκινητήρες ενσωματωμένοι επί των τροχών στον οπίσθιο άξονα του με μέγιστη ισχύ 250 kW (2 x 125 kW).



Σχήμα 32: Το Solaris Urbino 12 Electric – 2 (<https://www.yotruck.gr/>)

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η Solaris προσφέρει τέσσερις διαφορετικούς τρόπους φόρτισης των μπαταριών, κάτι που του επιτρέπει να προσαρμόζεται στην υποδομή φόρτισης που είναι διαθέσιμη ή πρόκειται να δημιουργηθεί από τους αρμόδιους φορείς. Η πρώτη λύση είναι μια plug – in σύνδεση, με την ενέργεια να τροφοδοτείται μέσω εξωτερικών φορτιστών (τύπου πρίζας). Δεύτερος τρόπος φόρτισης είναι η επαγωγική φόρτιση μέσω ενός ειδικού πηνίου που βρίσκεται κάτω από το λεωφορείο, λαμβάνοντας ενέργεια από επαγωγικά πηνία που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του δρόμου, στα άκρα ή στις στάσεις κατά μήκος της διαδρομής. Η τρίτη μέθοδος μοιάζει με την επαγωγική φόρτιση στο ότι δεν απαιτεί από τον οδηγό να αφήσει την καμπίνα του. Συγκεκριμένα, πρόκειται για ένα σύστημα στην οροφή του λεωφορείου το οποίο συνδέεται αυτόματα (παντογράφος) σε σταθμούς φόρτισης στην αφετηρία ή σε στάσεις του λεωφορείου. Η σύντομη αλλά ισχυρή φόρτιση που επιτυγχάνεται αρκεί για να συνεχιστεί το δρομολόγιο μέχρι το επόμενο σημείο φόρτισης επιτρέποντας, έτσι, την απρόσκοπτη λειτουργία σε όλη την διάρκεια της ημέρας, χωρίς περιορισμούς. Ο τέταρτος τρόπος φόρτισης των μπαταριών είναι τα fuel cells. Αυτό σημαίνει ότι οι μπαταρίες εξακολουθούν να είναι ο κύριος πάροχος ενέργειας του συστήματος κίνησης, ωστόσο φορτίζουν μέσω fuel cells κατά την διάρκεια λειτουργίας του λεωφορείου. Η συγκεκριμένη μέθοδος εξομοιώνει το ηλεκτρικό λεωφορείο με ένα «συμβατικό» νηζελοκίνητο από άποψη αποδοτικότητας. Το λεωφορείο τροφοδοτείται με

υδρογόνο μια φορά την ημέρα στο αμαξοστάσιο και μπορεί να καλύψει έως και 300 χιλιόμετρα.



Σχήμα 33: Το Solaris Urbino 12 Electric – 3 (<https://www.youtruck.gr/>)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Το πρόβλημα Χωροθέτησης Εγκαταστάσεων (Facility Location Problem)

Η χωροθέτηση εγκαταστάσεων (facility location) είναι ένα από τα πιο συνηθισμένα και ιδιαίτερα σημαντικά προβλήματα που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι επιστήμες της Λήψης Αποφάσεων. Η τοποθεσία που θα επιλεγεί για την δημιουργία μία εγκατάστασης είναι πολύ σημαντική, γιατί καθορίζει την βέλτιστη παροχή υπηρεσιών για τις οποίες σχεδιάστηκε η εγκατάσταση αυτή. Τα οφέλη που απορρέουν από την χωροθέτηση εγκαταστάσεων είναι πολλά και για αυτό το λόγο έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες τα τελευταία χρόνια, οι οποίες αφορούν την ανάπτυξη και την βελτιστοποίηση των υπό σχεδιασμό δικτύων (Klise & Drexl, 2005). Επομένως, η σημασία της σωστής επιλογής της βέλτιστης τοποθεσίας για την εγκατάσταση μίας λειτουργικής μονάδας ασκεί καθοριστικό ρόλο στην μετέπειτα πορεία και λειτουργία της.

Οι εγκαταστάσεις χωροθετούνται με τέτοιο τρόπο, ώστε να ικανοποιούν την ζήτηση, τον ανεφοδιασμό, την κάλυψη περιοχών ή ακόμη και να αλληλοεπιδρούν με την ύπαρξη άλλων εγκαταστάσεων (Klose & Drexl, 2005). Πιο συγκεκριμένα, η επιλογή της βέλτιστης θέσης μίας εγκατάστασης γίνεται μετά από προσεκτική μελέτη, καθώς εξετάζεται μεν μεμονωμένα κάθε εγκατάσταση ως προς τα λειτουργικά της χαρακτηριστικά, σχετίζεται δε και με την ανάπτυξη και τον σχεδιασμό ευρύτερων συστημάτων με βάση την κατανομή των πόρων του συστήματος που εξυπηρετεί. Οι πόροι του συστήματος αποτελούν τα σταθερά σημεία του συστήματος, όπου ανάλογα με το πρόβλημα, αντιπροσωπεύουν άλλες εγκαταστάσεις, αγορές ή μία ή περισσότερες εγκαταστάσεις που πρόκειται να χωροθετηθούν – όπως στην παρούσα μελέτη η χωροθέτηση των φορτιστών – (Plastria, 1995). Ο γενικευμένος όρος, ο οποίος περιγράφει αυτή την διαδικασία αναζήτησης θέσεων για εγκαταστάσεις μέσα σε δίκτυα εξυπηρέτησης είναι: *προβλήματα χωροθέτησης – κατανομής (location – allocation problems)*. Σε τέτοιου είδους προβλήματα ζητείται η χωροθέτηση κέντρων εξυπηρέτησης σε συγκεκριμένο χώρο, με τρόπο τέτοιο, ώστε να καλύπτεται η ζήτηση στον χώρο αυτό με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

Ωστόσο, η επιλογή της βέλτιστης τοποθεσίας για την εγκατάσταση μίας λειτουργικής μονάδας, πέραν όλων όσων προαναφέρθηκαν, γίνεται και μέσω μίας πληθώρας κριτηρίων, τα οποία ποικίλουν ανάλογα με το είδος της μονάδας που θα εγκατασταθεί και τις ανάγκες που παρουσιάζει. Στον τομέα των μεταφορών, οι βασικότεροι στόχοι ενός προβλήματος βελτιστοποίησης αποτελούν η μείωση του κόστους μετακίνησης και ταυτόχρονα, η αύξηση της ποσότητας των αγαθών που μεταφέρονται μέσω του δικτύου που μελετάται, όπως και η εξοικονόμηση χρόνου.

Από τον ορισμό της χωροθέτησης εγκαταστάσεων προκύπτουν τέσσερα συστατικά που χαρακτηρίζουν τα προβλήματα χωροθέτησης:

- ♦ οι «πελάτες» (*customers*), οι οποίοι θεωρούνται ότι έχουν τοποθετηθεί σε συγκεκριμένα σημεία του χώρου, έχουν συγκεκριμένη κατανομή και παρουσιάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.
- ♦ οι «μονάδες» ή «εγκαταστάσεις» (*facilities*) που θα χωροθετηθούν.
- ♦ ο «χώρος» (*space*) στον οποίο βρίσκονται οι πελάτες και οι μονάδες εγκαταστάσεις που θα χωροθετηθούν.

- ♦ μια «μετρική» (*metric*), η οποία υποδεικνύει τις αποστάσεις ή τον χρόνο που απαιτείται ανάμεσα στους πελάτες και τις μονάδες-εγκαταστάσεις.

Με μια πιο απλουστευμένη θεώρηση – ερμηνεία, θα μπορούσε κανείς να πει ότι επιτυχής επίλυση ενός προβλήματος χωροθέτησης, σημαίνει ότι έχει βρεθεί και επιλεγεί η καλύτερη τοποθεσία σε έναν ορισμένο γεωγραφικό χώρο για την τοποθέτηση μιας ή περισσότερων μονάδων με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, ικανοποιώντας συγκεκριμένα κριτήρια και στόχους που αφορούν κυρίως την επιτυχημένη παροχή υπηρεσιών σε καταναλωμένους πελάτες.

Το πρόβλημα της χωροθέτησης εγκαταστάσεων αντιμετωπίζεται με την διατύπωση και την επίλυση ενός μαθηματικού μοντέλου, το οποίο θα περιλαμβάνει μία σειρά από μεταβλητές, περιορισμούς και μία αντικειμενική συνάρτηση. Απώτερος στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους μετακίνησης. Η ανάπτυξη μαθηματικών προτύπων και αλγορίθμων τοποθέτησης εγκαταστάσεων κάθε τύπου σε χωρικό ή γεωγραφικό περιβάλλον αναφέρεται ως *ανάλυση χωροθέτησης – location analysis*.

3.1: Η Μεθοδολογική Προσέγγιση του Προβλήματος

Τα προβλήματα χωροθέτησης – κατανομής ανήκουν σε εκείνη την κατηγορία προβλημάτων, για τα οποία η χωρική διάσταση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της λύσης (χωροθέτηση υπηρεσιών, γεωγραφική αναδιοργάνωση υπάρχοντος συστήματος μονάδων παροχής υπηρεσιών, χωροθέτηση εγκαταστάσεων και τα λοιπά). Παράλληλα, η χωρική κατανομή των κρίσιμων μεγεθών του προβλήματος και οι προκύπτουσες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των εναλλακτικά πιθανών θέσεων χωροθέτησης κέντρων είναι καθοριστικοί παράγοντες της διαδικασίας επίλυσης τέτοιων προβλημάτων.

Η μαθηματική θεμελίωση των προβλημάτων χωροθέτησης – κατανομής έγινε από τον *Fermat* (1601-1655) και η πρώτη εφαρμογή τους από τον *Weber* (1909) για τη χωροθέτηση των καταστημάτων και των αποθηκών κάποιας επιχείρησης έτσι, ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος μεταφοράς των προϊόντων της.

Στη γενική τους μορφή τα προβλήματα χωροθέτησης – κατανομής πραγματεύονται το εξής θέμα:

« Με δεδομένο ένα χωρικό σύστημα ζήτησης, να χωροθετηθούν κέντρα παροχής υπηρεσιών – εξυπηρέτησης και να περιφερειοποιηθεί ο χώρος ως προς αυτά τα κέντρα, κατά τον "καλύτερο δυνατό τρόπο" (*Κουτσόπουλος, 1990*), όπου ο "καλύτερος δυνατός τρόπος" επιτυγχάνεται μέσω της βελτιστοποίησης κάποιας αντικειμενικής συνάρτησης, όπου μεγιστοποιείται το όφελος ή ελαχιστοποιείται η απώλεια από τη χρησιμοποίηση των εν λόγω κέντρων εξυπηρέτησης ».

Διαφοροποιήσεις της γενικής αυτής μορφής, με την εισαγωγή περιορισμών που αφορούν στη ζήτηση ή την εξυπηρέτηση και τη διατύπωση εναλλακτικών αντικειμενικών συναρτήσεων και υποθέσεων, οδήγησαν σε μια ποικιλία χωροθετικών προβλημάτων. Καθώς δε, τα διάφορα αυτά είδη προβλημάτων χωροθετικού σχεδιασμού παρουσιάζουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά, αποτελούν ελκυστικούς υποψήφιους για την ανάπτυξη γενικευμένων (*generic*) διαδικασιών για την επίλυσή τους.

Η χωροθέτηση εγκαταστάσεων αποτελεί ένα πολυδιάστατο πρόβλημα του οποίου η μεθοδολογική προσέγγιση ποικίλει ανάλογα με τις ανάγκες που παρουσιάζει κάθε πρόβλημα. Η μεθοδολογία που θα εφαρμοστεί καθορίζει την βέλτιστη τοποθεσία των λειτουργικών μονάδων βάσει ορισμένων χωρικά κατανομημένων προϋποθέσεων, οι οποίες αφορούν χαρακτηριστικά του 'χώρου' ή του 'περιβάλλοντος', τα οποία αποτελούν το χωρικό σύστημα ζήτησης υπηρεσιών. Κατόπιν επιλέγονται τα κατάλληλα σημεία μέσω κάποιων συγκεκριμένων μετρήσιμων κριτηρίων. Η επίλυση των μοντέλων χωροθέτησης καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τα κριτήρια που έχουν επιλεγεί, όπως και από την αντικειμενική συνάρτησης που θα χρησιμοποιηθεί, η οποία έχει ως στόχο, όπως προαναφέρθηκε, την βελτιστοποίηση αυτών των κριτηρίων.

Κάθε πρόβλημα χωροθέτησης είναι δυνατόν να αντιμετωπιστεί με διάφορους τρόπους, οπότε και μεταβάλλονται οι τρόποι επίλυσης τους λόγω των διαφορετικών κάθε φορά μαθηματικών προτύπων χωροθέτησης – κατανομής που εφαρμόζονται κάθε φορά. Υπάρχει, βέβαια, ένα γενικότερο μεθοδολογικό πλαίσιο, το οποίο βρίσκει εφαρμογή στα περισσότερα προβλήματα χωροθέτησης, και συνοψίζεται στα ακόλουθα βήματα (Rahman and Smith, 2000):

- ♦ Κατανόηση και καθορισμός του προβλήματος.
- ♦ Εννοιολογική και ποσοτική ανάπτυξη του αντίστοιχου μαθηματικού μοντέλου.
- ♦ Ανάλυση του μοντέλου.
- ♦ Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αυτού.
- ♦ Εκτέλεση των αποτελεσμάτων.

3.2: Μοντέλα Χωροθέτησης

Η χωροθέτηση εγκαταστάσεων, βάσει και των προαναφερθέντων, αποτελεί ένα κρίσιμο στοιχείο του στρατηγικού σχεδιασμού για ένα ευρύ φάσμα τόσο ιδιωτικών όσο και δημόσιων επιχειρήσεων (Owen & Daskin, 1998). Για αυτό το λόγο, λοιπόν, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη πολλά κριτήρια, όπως είναι το κόστος ή η απόσταση από τα σημεία ζήτησης. Έχουν αναπτυχθεί πολλά μοντέλα τα οποία έχουν σκοπό να συμβάλλουν στην λήψη αποφάσεων στον τομέα αυτό. Μία από τις πιο δημοφιλείς κατηγορίες των μοντέλων χωροθέτησης εγκαταστάσεων – facility location problems – είναι τα λεγόμενα προβλήματα κάλυψης – *Covering Problems*. Η κατηγορία αυτή ανέκαθεν αποτελούσε ένα ελκυστικό αντικείμενο για έρευνα, κάτι το οποίο οφείλεται στην εφαρμογή που έχει στην πραγματική ζωή ιδιαίτερα για υπηρεσίες εξυπηρέτησης ή έκτακτης ανάγκης. Σε ορισμένα προβλήματα κάλυψης ένας πελάτης θα πρέπει να εξυπηρετείται από τουλάχιστον μία εγκατάσταση σε μία δεδομένη κρίσιμη απόσταση – όχι απαραίτητα από την πλησιέστερη εγκατάσταση. Στα περισσότερα προβλήματα κάλυψης, οι πελάτες λαμβάνουν τις υπηρεσίες από μία εγκατάσταση ανάλογα με την απόσταση μεταξύ αυτών και των εγκαταστάσεων. Ο πελάτης μπορεί να λάβει μία υπηρεσία από κάθε εγκατάσταση της οποίας η απόσταση από αυτόν είναι μικρότερη ή ίση από μία προκαθορισμένη τιμή. Αυτή η κρίσιμη προκαθορισμένη τιμή ονομάζεται απόσταση ή ακτίνα κάλυψης (Fallah, NaimiSadigh & Aslanzadeh, 2009). Επόμενως, η έννοια των προβλημάτων κάλυψης σχετίζεται με μία ικανοποιητική μέθοδο και

όχι με την καλύτερη δυνατή. Πολλά από τα προβλήματα, όμως, όπως ο προσδιορισμός του αριθμού και της τοποθεσίας των δημόσιων σχολείων, των αστυνομικών τμημάτων, των δημοσίων κτιρίων, των ταχυδρομείων, των εγκαταστάσεων ραντάρ, των εμπορικών κέντρων και βέβαια, η εγκατάσταση φορτιστών ηλεκτρικών οχημάτων και δει ηλεκτρικών λεωφορείων με την οποία ασχολείται η παρούσα διπλωματική εργασία, είναι δυνατόν να διατυπωθούν ως προβλήματα κάλυψης (Francis & White. 1974).

3.2.1: Τα Προβλήματα Κάλυψης στην Χωροθέτηση Εγκαταστάσεων

Τα προβλήματα κάλυψης εισήχθησαν στο πεδίο για πρώτη φορά από τον *Hakimi* (1965). Σκοπός του μοντέλου που ανέπτυξε ήταν να προσδιοριστεί ο ελάχιστος αριθμός των αστυνομικών που απαιτούνταν για την κάλυψη κόμβων σε ένα δίκτυο αυτοκινητοδρόμων. Διατυπώνει το πρόβλημα αυτό ως ένα πρόβλημα κάλυψης κορυφών σε ένα γράφημα – *Vertex Covering Problem*. Λαμβάνοντας υπόψιν το γράφημα G με το ίδιο βάρος να αποδίδεται σε όλους τους κλάδους, V ως το σύνολο των κορυφών του γραφήματος G , W ως το υποσύνολο του V , d ως την απόσταση και S ως την μέγιστη αποδεκτή απόσταση εξυπηρέτησης (ή χρόνος), το υποσύνολο του W μπορεί να καλύπτει το G εάν:

$$d(v_i, w) \leq S, \quad i = 1, \dots, n \quad (3.1)$$

όπου:

$$d(v_i, w) = \text{Min}[d(v_i, v_1), d(v_i, v_2), \dots, d(v_i, v_q)] \quad (3.2)$$

Το πρώτο μαθηματικό μοντέλο για τα προβλήματα κάλυψης αναπτύχθηκε από τους *Togeras, Swain, ReVelle* και *Bergman* (1971). Στην περίπτωση τους ανέλυαν την μοντελοποίηση της θέσης των εγκαταστάσεων παροχής υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης ως εξής:

- ♦ I : το σύνολο της ζήτησης των κόμβων, οι οποίοι συμβολίζονται με i .
- ♦ J : το σύνολο των υποψήφιων θέσεων εγκατάστασης, οι οποίες συμβολίζονται με j .
- ♦ d_{ij} : η απόσταση μεταξύ του κόμβου ζήτησης i και της υποψήφιας θέσης εγκατάστασης j .
- ♦ S : η μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση εξυπηρέτησης.
- ♦ N_i : το σύνολο των πιθανών θέσεων εγκατάστασης που μπορούν να καλύψουν την ζήτηση στο σημείο i έτσι, ώστε να ισχύει:

$$N_i = \{j \mid d_{ij} \leq S\}$$

- ♦ x_j : η μεταβλητή απόφασης η οποία δείχνει εάν θα χωροθετηθεί η εγκατάσταση στη θέση j ($= 1$) ή όχι ($= 0$).

Με τις παραπάνω μεταβλητές να έχουν πλέον οριστεί, το πρόβλημα του συνόλου κάλυψης μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

- ♦ Αντικειμενική Συνάρτηση:

$$\text{Min } Z = \sum_{j=1}^n x_j \quad (3.3)$$

υπό τους ακόλουθους περιορισμούς:

$$1. \sum_{j \in N_i} x_j \geq 1, \quad i = 1, \dots, m \quad (3.4)$$

$$2. x_j \in \{0,1\}, \quad j = 1, \dots, n \quad (3.5)$$

Στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης (3.3) είναι η ελαχιστοποίηση του αριθμού των εγκαταστάσεων που πρόκειται να χωροθετηθούν. Ο περιορισμός (3.4) δηλώνει ότι κάθε κόμβος ζήτησης καλύπτεται από τουλάχιστον μία εγκατάσταση ενώ, ο περιορισμός (3.5) ενισχύει την απόφαση της χωροθέτησης ή μη με ένα ναι (= 1) ή με ένα όχι (= 0).

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι δύο πιο συνηθισμένες ταξινομήσεις των μοντέλων κάλυψης και συγκεκριμένα, οι αρχικές μαθηματικές διατυπώσεις για αυτές τις δύο κατηγορίες. Να σημειωθεί, ότι υπάρχουν αρκετές επεκτάσεις των δύο αυτών ταξινομήσεων, οι οποίες θα αναφερθούν ονομαστικά με το πέρας της παρουσίασης της εκάστοτε βασικής ταξινόμησης.

3.2.2: Το Πρόβλημα του Συνόλου Κάλυψης – The Set Covering Location Problem

Η πρώτη βασική ταξινόμηση των μοντέλων κάλυψης είναι το πρόβλημα του συνόλου κάλυψης. Στόχος σε αυτό είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης μίας υπηρεσίας ικανοποιώντας ένα συγκεκριμένο επίπεδο κάλυψης. Η μαθηματική διατύπωση αυτού του προβλήματος έχει ως εξής:

- ♦ I : το σύνολο της ζήτησης των κόμβων, οι οποίοι συμβολίζονται με i .
- ♦ J : το σύνολο των υποψήφιων θέσεων εγκατάστασης, οι οποίες συμβολίζονται με j .
- ♦ S : η μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση εξυπηρέτησης.
- ♦ x_j : η μεταβλητή απόφασης η οποία δείχνει εάν θα χωροθετηθεί η εγκατάσταση στη θέση j (= 1) ή όχι (= 0).
- ♦ c_j : το κόστος εγκατάστασης (σταθερό) μίας υπηρεσίας στον κόμβο j .
- ♦ a_{ij} : δυαδική μεταβλητή η οποία ισούται με 1 ένα η απόσταση από την υποψήφια θέση εγκατάστασης j έως την υπάρχουσα εγκατάσταση i (στην οποία βρίσκεται ο πελάτης) δεν είναι μεγαλύτερη από S .

Με τις παραπάνω μεταβλητές να έχουν πλέον οριστεί, το πρόβλημα του συνόλου κάλυψης μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

- ♦ Αντικειμενική Συνάρτηση:

$$\text{Min } Z = \sum_{j=1}^n c_j \cdot x_j \quad (3.6)$$

υπό τους ακόλουθους περιορισμούς:

$$1. \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j \geq 1, \forall i (i = 1, \dots, m) \quad (3.7)$$

$$2. x_j \in \{0,1\}, j = 1, \dots, n \quad (3.8)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.6) ελαχιστοποιεί το κόστος εγκατάστασης. Σύμφωνα, μάλιστα, με τους Garey & Johnson (1979) τόσο η μία όσο και η άλλη εκδοχή του μοντέλου συνόλου κάλυψης είναι NP – hard (non deterministic polynomial time – hard), δηλαδή προβλήματα τουλάχιστον τόσο ‘δύσκολα’ όσο οποιοδήποτε πρόβλημα της κλάσης NP. Η κλάση NP περιλαμβάνει όλα τα προβλήματα των οποίων η λύση μπορεί να επαληθευτεί πολυωνυμικά.

Το συγκεκριμένο μοντέλο καλείται και *Weighted Set Covering Problem (WSCP)* αλλά, και *Non – Unicast Set Covering Problem*. Να σημειωθεί, ότι εάν το κόστος όλων των εγκαταστάσεων που πρόκειται να χωροθετηθούν είναι το ίδιο, τότε η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να απλοποιηθεί στην μορφή της (3.3), η οποία ισοδυναμεί με την ελαχιστοποίηση του αριθμού των προς εγκατάσταση υπηρεσιών. Ο περιορισμός (3.7) επιβάλλει ότι για κάθε κόμβο ζήτησης, προκειμένου να καλυφθούν όλοι, τουλάχιστον μία εγκατάσταση πρέπει να βρίσκεται εντός του συνόλου N_i των πιθανών θέσεων εγκατάστασης. Ο περιορισμός (3.8) δηλώνει ότι η μεταβλητή x_j μπορεί να πάρει μόνο ακέραιες τιμές μεταξύ 0 και 1.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι εάν αντικατασταθεί η αντικειμενική συνάρτηση (3.3) με αυτό στο οποίο αποσκοπεί η αντικειμενική συνάρτηση του WSCP, προκύπτει ένα μοντέλο το οποίο μπορεί να ονομαστεί ως *Minimum Cardinality Set Covering Problem (MCSCP)* αλλά, και ως *Unicast Set Covering Problem*. Μάλιστα, οι Vasko και Wilson (1986) υποστηρίζουν ότι από υπολογιστικής άποψης η επίλυση του MCSCP είναι πιο δύσκολη από αυτή του WSCP.

Οι επεκτάσεις του προβλήματος συνόλου κάλυψης – set covering location problem είναι η εξής:

1. Location Set Covering Problem (LSCP) Implicit and Explicit
2. Capacitated Set Covering Problem
3. Quadratics Set Covering Problem
4. Multiple Optimal Set Covering Problem
5. Covering Tour Problem (CTP)
6. Path Covering Problem
7. Probabilistic Set Covering Problem
8. Stochastic Set Covering Problem
9. Fuzzy Set Covering Problem
10. Backup Coverage Set Covering Problems
11. Multiple Coverage Set Covering Problem
12. Multi – Criteria Set Covering Problem
13. Covering Games
14. Other variants of the Set Covering Problem

3.2.3: Το Πρόβλημα της Μέγιστης Κάλυψης – The Maximal Covering Location Problem

Στο προηγούμενο υποκεφάλαιο έγινε αναφορά στο πρόβλημα του συνόλου κάλυψης, βασική υπόθεση του οποίου είναι ότι όλοι οι κόμβοι ζήτησης πρέπει να καλυφθούν από μία αντίστοιχη εγκατάσταση. Δεν υφίσταται, δηλαδή, κάποιος περιορισμός προϋπολογισμού.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, όμως, αυτό απαιτεί την χωροθέτηση πάρα πολλών εγκαταστάσεων, με αποτέλεσμα οι λύσεις που προκύπτουν να μην είναι και οι πιο οικονομικά βιώσιμες. Άλλωστε, σε πολλές πρακτικές εφαρμογές οι οικονομικοί πόροι δεν επαρκούν για να καλύψουν όλες τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις με το επιθυμητό επίπεδο κάλυψης, αφού σχεδόν πάντα ο προϋπολογισμός λαμβάνεται υπόψιν. Για το σκοπό αυτό διατυπώθηκε το πρόβλημα της μέγιστης κάλυψης – *maximal covering location problem (MCLP)* από τους Church & ReVelle (1974). Σκοπός τους είναι η χωροθέτηση ενός προκαθορισμένου αριθμού εγκαταστάσεων, ο οποίος θα συμβολίζεται με P , με τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιείται η ζήτηση που καλύπτεται. Έτσι το MCLP υποθέτει ότι μπορεί να μην είναι αρκετές οι εγκαταστάσεις για να καλυφθούν όλοι οι κόμβοι ζήτησης. Αν δεν μπορούν όλοι οι κόμβοι να καλυφθούν, τότε το μοντέλο αναζητά εκείνο το σχήμα χωροθέτησης, το οποίο καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης.

Η μαθηματική διατύπωση αυτού του προβλήματος έχει ως εξής:

- ♦ I : το σύνολο της ζήτησης των κόμβων, οι οποίοι συμβολίζονται με i .
- ♦ J : το σύνολο των υποψήφια θέσεων εγκατάστασης, οι οποίες συμβολίζονται με j .
- ♦ h_i : η ζήτηση στον κόμβο i .
- ♦ S : η απόσταση εντός της οποίας πρέπει να είναι χωροθετημένη μία εγκατάσταση.
- ♦ P : ο συνολικός αριθμός εγκαταστάσεων προς χωροθέτηση.
- ♦ x_j : η μεταβλητή απόφασης η οποία δείχνει εάν θα χωροθετηθεί η εγκατάσταση στη θέση j ($= 1$) ή όχι ($= 0$).
- ♦ a_{ij} : δυαδική μεταβλητή η οποία ισούται με 1 ένα η απόσταση από την υποψήφια θέση εγκατάστασης j έως την υπάρχουσα εγκατάσταση i (στην οποία βρίσκεται ο πελάτης) δεν είναι μεγαλύτερη από S .
- ♦ z_i : δυαδική μεταβλητή απόφασης η οποία ισούται με 1 ένα καλυφθεί ένας κόμβος και με 0 ένα δεν καλυφθεί.

Με τις παραπάνω μεταβλητές να έχουν πλέον οριστεί, το πρόβλημα της μέγιστης κάλυψης μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

- ♦ Αντικειμενική Συνάρτηση:

$$\text{Max } Z = \sum_{i \in I} h_i \cdot z_i \quad (3.9)$$

υπό τους ακόλουθους περιορισμούς:

$$1. \quad z_i \leq \sum_{j \in J} a_{ij} \cdot x_j, \quad \forall i \in I \quad (3.10)$$

$$2. \quad \sum_{j \in J} x_j \leq P \quad (3.11)$$

$$3. \quad x_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J \quad (3.12)$$

$$4. \quad z_i \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I \quad (3.13)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.9) μεγιστοποιεί τις απαιτήσεις κάλυψης. Ο περιορισμός (3.10) εξηγεί την σχέση μεταξύ των μεταβλητών κάλυψης και χωροθέτησης και δηλώνει ότι ο κόμβος ζήτησης j καλύπτεται, εάν τουλάχιστον μία εγκατάσταση βρίσκεται σε μία από τις πιθανές τοποθεσίες που μπορούν να καλύψουν τον κόμβο αυτό. Για να θεωρηθεί κάποιος κόμβος ως επικαλυμμένος (covered), δηλαδή $z_i = 1$, πρέπει να υπάρχει κάποιο κέντρο παροχής υπηρεσιών, το οποίο να βρίσκεται σε ένα σημείο j εντός της απόστασης S του κόμβου i . Εάν κανένα κέντρο παροχής υπηρεσιών δεν τοποθετηθεί ώστε $j \in S$, τότε το δεξί μέλος του περιορισμού (3.10) θα ισούται με μηδέν, 'αναγκάζοντας' δηλαδή το z_i να μηδενιστεί. Ο περιορισμός (3.11) περιορίζει τον αριθμό των προς χωροθέτηση εγκαταστάσεων ενώ, οι περιορισμοί (3.12) και (3.13) δηλώνουν ότι οι μεταβλητές x_j και z_i μπορούν να πάρουν μόνο ακέραιες τιμές μεταξύ 0 και 1.

Οι επεκτάσεις του προβλήματος μέγιστης κάλυψης – maximal covering location problem είναι η εξής:

1. Maximal Covering Location Problem Implicit and Explicit
2. Planar Maximal Covering
3. Capacitated MCLP
4. MCLP with a criticality index analysis metric
5. MCLP with mandatory closeness constraints
6. Probabilistic MCLP
7. MALP I
8. MALP II
9. Maximum Covering Location – interdiction problem
10. Median Tour Problem (MTP) and Maximal Covering Tour Problem (MCTP)
11. Partial coverage problem
12. Generalized MCLP (GMCLP)
13. Gradual Coverage
14. Backup Coverage Location Problem (BCLP)
15. P – Maximal cover problem
16. Quadratic MCLP
17. Multiple facility quantity – of – coverage
18. Complementary edge covering problem
19. Other variants of the MCLP

3.2.4: Το Μοντέλο Κάλυψης Κορυφών – The Vertex Cover Problem

Η θεωρία γράφων είναι ένα γνωστικό πεδίο των διακριτών μαθηματικών με εφαρμογές στην πληροφορική, στις επιστήμες μηχανικών, στη χημεία, στην κοινωνιολογία και άλλα. Στην ελληνική ορολογία οι όροι *θεωρία γραφημάτων* και *θεωρία γράφων* χρησιμοποιούνται ως ισοδύναμοι αλλά, προτιμάται η χρήση του όρου *γράφου* ώστε να υπάρχει μία διάκριση από το γράφημα συνάρτησης. Ανάμεσα στους ποικίλους ορισμούς που απαντώνται, ένας σχετικά πλήρης ορίζει ότι η θεωρία γράφων είναι η μελέτη των γράφων και των σχέσεων τους. Οι μαθηματικοί υπολογισμοί επί των γράφων υλοποιούνται με συγκεκριμένους αλγορίθμους. Με γράφους είναι δυνατόν να μοντελοποιηθούν πολλές διαφορετικές φυσικές ή τεχνολογικές δομές, όπως τα δίκτυα υπολογιστών, όπου το διάγραμμα ενός δικτύου μοντελοποιείται ως ένας απλός κατευθυνόμενος γράφος.

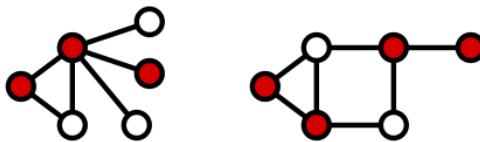
Ο γράφος στον απλούστερο ορισμό του είναι η οπτική αναπαράσταση των σχέσεων που αναπτύσσουν ορισμένες ποσότητες, σχεδιασμένες σε σχέση με ένα σύνολο αξόνων. Ένας άλλος ορισμός που κινείται στο ίδιο εννοιολογικό πλαίσιο της οπτικής αναπαράστασης αναγνωρίζει τον γράφο ως απεικόνιση, αποτελούμενη από ένα σύνολο σημείων (κορυφών ή κόμβων) τα οποία συνδέονται με γραμμές (ακμές). Στους κατευθυνόμενους ή προσανατολισμένους γράφους οι ακμές απεικονίζονται διανυσματικά. Σε μία άλλη εκδοχή είναι ένα σύνολο από κόμβους (κορυφές), οι οποίες ενώνονται μεταξύ τους με ακμές και ορίζεται από τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται οι κορυφές (κόμβοι). Αν οι ακμές προσανατολίζονται οριζόμενες από διατεταγμένα ζεύγη κόμβων, τότε ο γράφος αποκαλείται κατευθυνόμενος. Αν οι ακμές δεν προσανατολίζονται, οριζόμενες απλώς από διμελή σύνολα και όχι διατεταγμένα ζεύγη, τότε αποκαλείται μη κατευθυνόμενος.

Βάσει, λοιπόν, όλων των προαναφερθέντων ένα *vertex cover* – κάλυμμα κορυφής ενός γραφήματος είναι ένα σύνολο κορυφών τέτοιο, ώστε κάθε άκρη στο γράφημα αυτό να έχει τουλάχιστον μία κορυφή σαν τερματικό σημείο. Αυτό σημαίνει ότι κάθε κορυφή στο γράφημα ακουμπάει τουλάχιστον ένα άκρο. Το πρόβλημα της εύρεσης ενός ελάχιστου καλύμματος κορυφών – *minimum vertex cover problem* – είναι ένα κλασσικό πρόβλημα βελτιστοποίησης στην επιστήμη των υπολογιστών και αποτελεί ένα τυπικό παράδειγμα προβλήματος βελτιστοποίησης NP – hard, το οποίο έχει έναν αλγόριθμο προσέγγισης. Ο λόγος για τον οποίο ένα *vertex cover* πρόβλημα είναι NP – hard είναι το γεγονός ότι κάθε λύση μπορεί να επαληθευτεί σε πολυωνυμικό χρόνο με n^2 εξετάσεις όλων των άκρων ώστε, να γίνει φανερό εάν τα τερματικά σημεία εμπεριέχονται στο προτεινόμενο κάλυμμα κορυφής. Η έκδοση απόφασης – *decision version* – αυτού το προβλήματος κάλυψης ήταν ένα από τα 21 NP – complete προβλήματα του *Karp* και επομένως, είναι ένα κλασσικό πρόβλημα NP – complete στην θεωρία της υπολογιστικής πολυπλοκότητας. Επίσης, ένα *vertex cover* πρόβλημα μπορεί να είναι μία καλή προσέγγιση σε ένα πρόβλημα όπου όλα τα άκρα ενός γραφήματος πρέπει να συμπεριληφθούν στην λύση του προβλήματος.

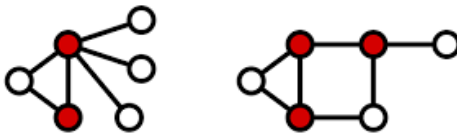
- ♦ Ο Μαθηματικός Ορισμός του Προβλήματος

Το κάλυμμα κορυφής ενός μη κατευθυνόμενου γράφου $G = (V, E)$ είναι ένα υποσύνολο U του $V - U \subseteq V$ – τέτοιο, ώστε για κάθε $(u, v) \in E$ τουλάχιστον μία από τις κορυφές, u ή v , να εμπεριέχονται στο υποσύνολο U , και ταυτόχρονα ο αριθμός των στοιχείων του υποσυνόλου αυτού να ελαχιστοποιείται. Δηλαδή, ένα σύνολο κορυφών όπου κάθε άκρο έχει τουλάχιστον ένα τερματικό σημείο – τερματική κορυφή – στο κάλυμμα κορυφής και δεν είναι απαραίτητα διαφορετικά μεταξύ τους. Ένα τέτοιο σύνολο λέγεται ότι καλύπτει τις άκρες του γραφήματος G .

Ένα *Minimum Vertex Cover* πρόβλημα είναι, στην ουσία, ένα *vertex cover* πρόβλημα αλλά, του μικρότερου δυνατού μεγέθους. Όπως προαναφέρθηκε, το πρόβλημα αυτό αποτελεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης στο οποίο εντοπίζεται το μικρότερο δυνατό κάλυμμα σε ένα δεδομένο γράφο. Στην περίπτωση που το πρόβλημα αναφέρεται ως ένα πρόβλημα απόφασης η ονομασία του είναι '*vertex cover problem*'. Αναφέρθηκε, επίσης, ότι το πρόβλημα αυτό είναι ένα NP – complete - '*nondeterministic polynomial – time complete*' πρόβλημα ανάμεσα από τα 21 NP – complete προβλήματα του *Richard Karp*. Αυτό σημαίνει, ότι παρόλο που ένα τέτοιο πρόβλημα μπορεί να επαληθευτεί γρήγορα, είναι απίθανο να υπάρχει ένα αποτελεσματικός αλγόριθμος για να επιλύσει γρήγορα αυτό το πρόβλημα για αυθαίρετους γράφους. Στις ακόλουθες εικόνες παρουσιάζεται ένα παράδειγμα *vertex cover problem* (άνω εικόνα) και ένα παράδειγμα *minimum vertex cover problem* (κάτω εικόνα):



Σχήμα 34: Vertex Covering Problem (<http://isaacsteele.com/>)



Σχήμα 35: Minimum Vertex Covering Problem (<http://isaacsteele.com/>)

- Η Εφαρμογή του Μοντέλου Κάλυψης Κορυφής – Vertex Cover Problem – στην Χωροθέτηση Φορτιστών Ηλεκτρικών Λεωφορείων:

Έστω ότι το σύνολο των στάσεων ηλεκτρικών λεωφορείων στο δεδομένο δίκτυο είναι $|V|$, και το σύνολο των διαδρομών αυτών είναι $|E|$. Εάν υπάρχει ένας σύνδεσμος $(u, v) \in E$, όπου $u, v \in V$, τότε τα σημεία u, v είναι διαδρομή ηλεκτρικού λεωφορείου, η οποία ανήκει στο σύνολο E . Έτσι, το πρόβλημα εύρεσης του ελάχιστου καλύμματος κορυφών – minimum vertex cover problem – στο γράφημα $G = (V, E)$ μετατρέπεται σε ένα πρόβλημα εύρεσης του ελάχιστου αριθμού στάσεων ηλεκτρικών λεωφορείων στις οποίες θα εγκατασταθεί φορτιστής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Προηγούμενες Έρευνες

Έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες με σκοπό την εγκατάσταση σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών λεωφορείων, η κάθε μία από τις οποίες διαφέρει τόσο στο θέμα της υλοποίησης όσο και στην σκέψη που έχει προηγηθεί. Μία μελέτη που δημοσιεύτηκε από τους *Maria Xylia et al (2017)* χρησιμοποίησε μικρό ακέραιο προγραμματισμό (mixed integer linear programming) στο λογισμικό GAMS για την βελτιστοποίηση της κατανομής της υποδομής φόρτισης για τα ηλεκτρικά λεωφορεία και το μοντέλο που δημιουργήθηκε δοκιμάστηκε για το δίκτυο ηλεκτρικών λεωφορείων στην Στοκχόλμη, Σουηδία. Στην μελέτη αυτή εξετάστηκαν δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Η μία περίπτωση αφορούσε την βελτιστοποίηση της ενέργειας και η άλλη του συνολικού κόστους. Η μελέτη βασίστηκε σε μία εισαγωγή 143 διαδρομών λεωφορείων και 403 υπαρχουσών στάσεων λεωφορείων, όπου το 70% αυτών των στάσεων εξυπηρετούσαν περισσότερες εκ της μίας διαδρομές. Οι διαδρομές και οι στάσεις των λεωφορείων επιλέχθηκαν βάσει της τοποθεσίας τους. Η υπόθεση των ερευνητών ήταν ότι η εγκατάσταση των σταθμών φόρτισης ταιριάζει καλύτερα στα σημεία εκείνα τα οποία αποτελούν κόμβους, με μεγάλη ζήτηση, αλλά και στις στάσεις έναρξης και λήξης των δρομολογίων των ηλεκτρικών λεωφορείων. Η υπόθεση αυτή βασίστηκε στο ότι η αυξημένη ζήτηση που παρουσιάζεται στους κόμβους αυτούς είναι ένας σταθερός παράγοντας, αφού σε αυτά τα σημεία υφίσταται σιδηροδρομικό δίκτυο. Επιπλέον, οι συγκεκριμένες τοποθεσίες είχαν ήδη ένα σύστημα δικτύου υψηλής τάσης για να εξυπηρετεί την παροχή ενέργειας στα τρένα. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής έδειξαν ότι μόνο το 10 – 25 % των στάσεων του δικτύου απαιτούσαν σταθμό φόρτισης, και μάλιστα ότι η εγκατάσταση μίας τέτοιας υποδομής απαιτεί και υψηλό κόστος. Γι' αυτό το λόγο το να γίνει η εγκατάσταση στις στάσεις εκείνες όπου η ζήτηση είναι μεγάλη, δικαιολογεί σε ένα βαθμό το υψηλό κόστος που προκύπτει. Επίσης, στην συγκεκριμένη μελέτη δεν λήφθηκε υπόψιν η φόρτιση στο αμαξοστάσιο λόγω έλλειψης σχετικών δεδομένων αν και προτάθηκε ότι κάτι τέτοιο ίσως αποτελούσε και την βέλτιστη λύση. Η κατακλείδα ήταν ότι μία μελέτη που θα καθόριζε τις απαιτήσεις σε ενέργεια θα ήταν ιδιαίτερα σημαντική, καθώς ίσως το ηλεκτρικό δίκτυο να μην είναι έτοιμο να προσαρμοστεί σε τέτοιες απαιτήσεις.

Οι *Xiumim Wang et al (2017)* χρησιμοποίησαν ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό (ILP) προκειμένου να γίνει η τοποθέτηση σταθμών φόρτισης με αντικειμενική συνάρτηση η οποία ελαχιστοποιούσε το κόστος εγκατάστασης. Στη μελέτη αυτή υποτέθηκε ότι το λεωφορείο έχει αρκετή ενέργεια για να ολοκληρώσει το δρομολόγιό του, συμπεριλαμβανομένης και της επιστροφής και διερευνήθηκαν δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη λήφθηκε υπόψιν το μέγεθος της μπαταρίας και στην άλλη όχι. Λαμβάνοντας υπόψιν το μέγεθος της μπαταρίας περιορίζεται η ποσότητα ενέργειας που μπορεί να είναι διαθέσιμη και δεν μπορεί να ξεπεραστεί μία συγκεκριμένη τιμή. Χρησιμοποιήθηκε το σύστημα Meter – Kilogram – Second στην προσομοίωση, δηλαδή μία μονάδα ενέργειας αντιστοιχεί σε μία kWh. Θεωρήθηκε, λοιπόν, μία μπαταρία 20 μονάδων ενέργειας με ρυθμό επαναφόρτισης που κυμαίνεται από 4 έως 10 μονάδες ενέργειας. Η κατανάλωση ενέργειας ρυθμίστηκε να κυμαίνεται τυχαία μεταξύ 1 και 2 μονάδων ενέργειας και ο αριθμός των στάσεων των λεωφορείων κυμαίνεται μεταξύ 15 και 25. Ένας 'multiple backtracking – πολλαπλής υπαναχώρησης' αλγόριθμος και ένας 'greedy – άπληστος' αλγόριθμος συγκρίθηκε με τα αποτελέσματα του ILP, τα οποία προέκυψαν μέσω του προγράμματος *NEOS server*. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο greedy αλγόριθμος έδωσε την λύση με το υψηλότερο κόστος ενώ, ο multiple backtracking αλγόριθμος έδωσε χαμηλότερο και ο ILP παρείχε το χαμηλότερο επενδυτικό κόστος. Η διαφορά στους παραπάνω αλγορίθμους έγκειται στην πολυπλοκότητα, και μάλιστα, ένας

backtracking αλγόριθμος είναι πιο πολύπλοκος από τον greedy αλγόριθμο, με αποτέλεσμα οι τιμές που δίνει να είναι πιο κοντά σε αυτές του ILP, ο οποίο έδωσε και τα πιο ακριβή αποτελέσματα.

Οι *Xiaompei Wu et al (2020)* πρότειναν ένα μοντέλο χωροθέτησης σταθμών ταχείας φόρτισης για το δίκτυο ηλεκτρικών λεωφορείων, το οποίο λαμβάνει υπόψιν τόσο το δίκτυο λειτουργίας τους όσο και το δίκτυο διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Το μοντέλο προσομοιώνει πλήρως το δίκτυο λειτουργίας των ηλεκτρικών λεωφορείων ώστε να βρεθεί η ζήτηση για ενέργεια που απαιτείται για την φόρτισή τους και λαμβάνει υπόψιν την ικανότητα του δικτύου διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας και άλλους περιορισμούς στον καθορισμό της χωρητικότητας και της διανομής. Ο στόχος του μοντέλου είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης, του κόστους ταξιδιού προς τους σταθμούς φόρτισης και το κόστος των απωλειών ισχύος των σταθμών φόρτισης στους τερματικούς σταθμούς. Η μέθοδος ταξινόμησης 'Affinity Propagation' υιοθετείται προκειμένου να ταξινομηθούν τα λεωφορεία στους τερματικούς σταθμούς και να ληφθεί ένας αρχικός αριθμός για τους σταθμούς φόρτισης που απαιτούνται. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος 'Binary Particle Swarm Optimization' για την βελτιστοποίηση της τοποθεσίας εγκατάστασης των φορτιστών και της χωρητικότητας αυτών. Τέλος, το μοντέλο αυτό εφαρμόζεται προκειμένου να γίνει μία προσομοίωση και μία ανάλυση της λειτουργίας του δικτύου των ηλεκτρικών λεωφορείων σε μία παράκτια πόλη της Νότιας Κίνας. Η συγκεκριμένη μελέτη δείχνει ότι το μοντέλο αυτό μπορεί να βελτιστοποιήσει αποτελεσματικά την διάταξη των σταθμών φόρτισης στην συγκεκριμένη πόλη.

Ο *Yi He et al (2018)* στη μελέτη τους εξέτασαν την ζήτηση στην ηλεκτρική ενέργεια στο πρόβλημα της βέλτιστης εγκατάστασης σταθμών φόρτισης για το δίκτυο ηλεκτρικών λεωφορείων. Αφορμή αποτέλεσε το γεγονός ότι η γρήγορη φόρτιση μπορεί να οδηγήσει σε υψηλές χρεώσεις στη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας, κάτι που υπονομεύει την ανταγωνιστικότητα των ηλεκτρικών λεωφορείων ως εναλλακτική στις μεταφορές, και το ότι ένα ζήτημα σαν αυτό συνήθως αγνοείται από τα λοιπά μοντέλα χωροθέτησης σταθμών γρήγορης φόρτισης. Το πρόβλημα διατυπώνεται ως ένα μοντέλο μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού με απώτερο στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους των μπαταριών των ηλεκτρικών λεωφορείων, των σταθμών φόρτισης, των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και των χρεώσεων της ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια, οι οποίες χρεώσεις γίνονται μηνιαία και υπολογίζονται με βάση την αιχμή της ζήτησης σε ενέργεια επί μία τιμή μονάδας (\$ / kW). Αποτελεί, στην ουσία, την υψηλότερη μέση τιμή ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα από 15 έως 60 λεπτά. Διεξάχθηκαν μελέτες οι οποίες βασίστηκαν στο δίκτυο λεωφορείων της Salt Lake City, Utah, προκειμένου να καταδείξουν την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου μοντέλου και να προσδιοριστεί η εισαγωγή των σταθμών γρήγορης φόρτισης, ο σχεδιασμός του μεγέθους της μπαταρίας των ηλεκτρικών λεωφορείων και η εγκατάσταση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (energy storage systems). Η συγκεκριμένη μελέτη δείχνει ότι τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να είναι μία αρκετά καλή λύση για την αντιμετώπιση των υψηλών χρεώσεων στην ζήτηση λόγω της γρήγορης φόρτισης.

Ο *Alexander Kunitz et al (2018)* στη έρευνα τους δίνουν έμφαση στην αξιοπιστία της παροχής ενέργειας για την διατήρηση μίας σταθερότητας στην λειτουργία του ηλεκτρικού λεωφορείου ακόμη και υπό απαιτητικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, αναφέρουν ότι μία αποτελεσματική διάταξη της υποδομής φόρτισης και μία κατάλληλη επιλογή χωρητικότητας της μπαταρίας είναι δύο παράγοντες ζωτικής σημασίας για την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους ιδιοκτησίας αλλά, και για να επιτραπεί μία ενεργειακά εφικτή λειτουργία

του ηλεκτρικού λεωφορείου. Αναπτύσσουν ένα μοντέλο γραμμικής βελτιστοποίησης, μικτού ακέραιου προγραμματισμού για τον προσδιορισμό του ελάχιστου αριθμού αλλά και της θέσης των απαιτούμενων σταθμών φόρτισης για ένα δίκτυο ηλεκτρικών λεωφορείων, καθώς και για τον προσδιορισμό της κατάλληλης χωρητικότητας της μπαταρίας για κάθε γραμμή του δικτύου. Η κατανάλωση ενέργειας για κάθε τμήμα της εκάστοτε διαδρομής υπολογίζεται βάσει της ίδιας της διαδρομής, του τύπου του λεωφορείου, της συνθήκες που επικρατούν στην κυκλοφορία και άλλα. Εξετάζονται διαφορετικά σενάρια προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση της ισχύος φόρτισης, του κλίματος και οι μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας. Επιπλέον, τα αποτελέσματα τονίζουν και μία 'ανταλλαγή' μεταξύ της χωρητικότητας της μπαταρίας και της υποδομής φόρτισης υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας και υπό διαφορετική διάταξη της υποδομής φόρτισης. Το συγκεκριμένο άρθρο, επίσης, εξετάζει και τις προσεχείς προκλήσεις για τις αρμόδιες αρχές κατά την διαδικασία μετατροπής των στόλων λεωφορείων τους σε ηλεκτρικούς και δίνει ιδιαίτερη έμφαση στα διάφορα ζητήματα της υποδομής τα οποία σχετίζονται με την έννοια της γρήγορης φόρτισης.

Οι *Uslu & Kaya (2020)* στην έρευνά τους προτείνουν ένα μαθηματικό μοντέλο μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού για τον προσδιορισμό της θέσης και του αριθμού των σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών λεωφορείων προκειμένου να διασφαλιστεί η συνδεσιμότητα του οδικού δικτύου σε μία συγκεκριμένη περιοχή. Οι διαδρομές που ακολουθούν τα ηλεκτρικά λεωφορεία σε μία χώρα, η ζήτηση σε κάθε διαδρομή και η αυτονομία των ηλεκτρικών λεωφορείων είναι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη ώστε να προσδιοριστούν οι θέσεις και ο αριθμός των σταθμών φόρτισης υπό τον περιορισμό του χρόνου αναμονής σε αυτούς – ο οποίος δεν θα πρέπει να υπερβαίνει μία συγκεκριμένη τιμή. Το μοντέλο εφαρμόζεται στην περίπτωση του δικτύου υπεραστικών λεωφορείων στην Τουρκία και χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα από τις εταιρείες πούλμαν που εξυπηρετούν το δίκτυο αυτό. Τα αποτελέσματα παρέχουν τις βέλτιστες τοποθεσίες και δυνατότητες των σταθμών φόρτισης με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Επιπλέον, πραγματοποιείται μία ανάλυση ευαισθησίας για την ανάλυση των επιπτώσεων της αλλαγής των διαφορετικών παραμέτρων στα αποτελέσματα. Παρατηρείται ότι η αυτονομία του ηλεκτρικού λεωφορείου έχει την μεγαλύτερη σημασία στην αποτελεσματική χρήση αυτών, και παράμετροι όπως η διάρκεια φόρτισης, ο αριθμός των δρομολογίων και οι ρυθμοί εξυπηρέτησης των ηλεκτρικών λεωφορείων – πόσο γρήγορα θα φορτίζει το λεωφορείο στο σταθμό φόρτισης – επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τον αριθμό των σταθμών φόρτισης που θα εγκατασταθούν στις εκάστοτε τοποθεσίες.

Οι *Onur Elma et al (2020)* στη μελέτη τους εξέτασαν το σύστημα εξαιρετικά γρήγορης φόρτισης (ultra – fast charging system) για την μείωση του χρόνου φόρτισης των δημόσιων ηλεκτρικών λεωφορείων. Αναφέρουν, συγκεκριμένα, ότι οι περισσότεροι από τους γρήγορους φορτιστές συνεχούς ρεύματος της αγοράς (DC fast chargers) είναι ισχύος 50 – 150 kW. Τέτοιες ισχύς μπορούν να προσφέρουν έναν ικανοποιητικό και σχετικά σύντομο χρόνο φόρτισης για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα αλλά όχι για επαγγελματικά οχήματα, όπως λεωφορεία ή φορτηγά. Έτσι, ο γρήγορος φορτιστής DC χρήζει βελτίωσης, ώστε να είναι ικανός να φορτίζει μπαταρίες μεγαλύτερης χωρητικότητας σε αποδεκτό χρόνο. Όσο οι μπαταρίες με τις οποίες εξοπλίζονται τα ηλεκτρικά οχήματα και η τεχνολογία γύρω από την ηλεκτρονική ισχύς εξελίσσονται, καθίσταται δυνατή η χρήση ενός αρκετά πιο γρήγορου ρυθμού ισχύος για την επίτευξη της γρήγορης φόρτισης. Στη μελέτη τους ελήφθησαν υπόψη τα αναβαθμισμένα πρότυπα φορτιστή, όπως τα CHAdeMO και SAE. Κατά συνέπεια, το σύστημα εξαιρετικά γρήγορης φόρτισης ισχύος 450 kW χρησιμοποιείται για την φόρτιση κατά μήκος της διαδρομής ενός ηλεκτρικού λεωφορείου (on – route charging) αλλά, και για

την ανάλυση του μεγέθους της μπαταρίας αυτού. Επιπλέον, το πλεονέκτημα της ύπαρξης σταθμού φόρτισης κατά τη διαδρομή αξιολογείται και συγκρίνεται με το ότι δεν υπάρχει σταθμός φόρτισης στους τερματικούς σταθμούς. Οι δημόσιες διαδρομές λεωφορείων έχουν χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της χωρητικότητας της μπαταρίας του λεωφορείου σύμφωνα με τα προγραμματισμένα δρομολόγια των λεωφορείων, το χρόνο στάσης και το εξαιρετικά γρήγορο όριο ισχύος του φορτιστή. Υπολογίζεται, τέλος, το βέλτιστο μέγεθος της μπαταρίας και προτείνεται το βέλτιστο μήκος διαδρομής για ένα δεδομένο σενάριο για τα ηλεκτρικά λεωφορεία.

Οι *Christina Iliopoulou, Konstantinos Kepaptsoglou et al. (2019)* στη μελέτη τους επικεντρώθηκαν στην ανάπτυξη και στην δοκιμή ενός ολοκληρωμένου μοντέλου σχεδιασμού διαδρομών για την περίπτωση ενός δικτύου μεταφορών, το οποίο λειτουργεί αποκλειστικά με στόλο ηλεκτρικών λεωφορείων. Το πρόβλημα αυτό ονομάζεται E – TRNDP (Electric – Transit Route Network Design Problem). Διατυπώνεται μαθηματικά ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης δύο επιπέδων, το οποίο προσπαθεί να σχεδιάσει με τον βέλτιστο τρόπο αποτελεσματικές διαδρομές διέλευσης ηλεκτρικών λεωφορείων και να χωροθετήσει τους απαιτούμενους φορτιστές. Ένας πολύ – αντικειμενικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης νέφους σημείων (multi – objective particle swarm optimization algorithm) σε συνδυασμό με ένα μοντέλο μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού με την αντικειμενική συνάρτηση να αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του αριθμού των προς εγκατάσταση φορτιστών χρησιμοποιούνται για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος. Ως δεδομένο για την δοκιμή του μοντέλου χρησιμοποιείται ένα υπάρχον δίκτυο μεταφοράς και τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το προτεινόμενο μοντέλο και η μέθοδος λύσης αποδίδουν ρεαλιστικά αποτελέσματα σχεδιασμού σε ένα αποδεκτό χρονικό διάστημα. Όσον αφορά την χωροθέτηση των απαραίτητων φορτιστών χρησιμοποιήθηκαν ρεαλιστικές τιμές για τις διάφορες παραμέτρους που εισήχθησαν και εξετάστηκαν ρεαλιστικές στρατηγικές φόρτισης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το κόστος χρήσης μπορεί να μειωθεί σημαντικά εάν αυξηθεί ο μέσος χρόνος ταξιδιού ανά επιβάτη κατά 25%, ποσοστό που αντιστοιχεί σε 4 λεπτά. Επιπλέον, η ανάλυση ευαισθησίας υπογραμμίζει τις περίπλοκες αντισταθμίσεις μεταξύ των διαφορετικών παραμέτρων σχεδιασμού, οι οποίες δείχνουν ότι η χωρητικότητα της μπαταρίας, το βάθος αποφόρτισης και οι χρόνοι επαναφόρτισης είναι αλληλένδετες και πρέπει να εξεταστούν προσεκτικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Το Μαθηματικό Μοντέλο

Το αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας είναι να βρεθούν οι βέλτιστες τοποθεσίες για την εγκατάσταση φορτιστών ηλεκτρικών λεωφορείων για ένα συγκεκριμένο δίκτυο διαδρομών, λαμβάνοντας υπόψιν τον χρόνο αναμονής των λεωφορείων στις τερματικές στάσεις. Στις ακόλουθες ενότητες παρουσιάζεται η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος. Παρακάτω δίνεται μία επισκόπηση της προσέγγισης που υιοθετήθηκε για την συγκεκριμένη μελέτη, η οποία αποτελείται από πέντε βήματα:

1. Τη συλλογή των δεδομένων.
2. Την ανάπτυξη διαφορετικών σεναρίων για την βελτιστοποίηση.
3. Την ανάπτυξη και επαλήθευση του μοντέλου.
4. Την βελτιστοποίηση.
5. Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης.

Το πρώτο βήμα της μελέτης αυτής, όπως φαίνεται και παραπάνω, είναι η συλλογή των δεδομένων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη του μοντέλου βελτιστοποίησης. Τα περισσότερα εκ των δεδομένων που συλλέχθηκαν προέρχονται από την αναζήτηση στην σχετική βιβλιογραφία χρησιμοποιώντας πηγές όπως το google scholar, το IEEE, το science direct και την βιβλιοθήκη των διπλωματικών εργασιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Χρησιμοποιήθηκαν αρκετές λέξεις και φράσεις – κλειδιά στην αναζήτηση αυτή, μερικές εκ των κυριότερων είναι οι εξής: charging infrastructure for electric buses, waiting time, optimizing electric bus, placement of electric bus charging stations.

Βασιζόμενοι στην βιβλιογραφία αναπτύχθηκαν 9 διαφορετικές περιπτώσεις, όπως φαίνεται και στο δεύτερο στάδιο. Οι διαφορετικές περιπτώσεις περιλάμβαναν αλλαγές στην επιθυμητή χωρητικότητα της μπαταρίας, στο ελάχιστο και μέγιστο επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας, στην ισχύ των φορτιστών στις ενδιάμεσες και τερματικές στάσεις, στην συχνότητα άφιξης των ηλεκτρικών λεωφορείων στις τερματικές στάσεις, όλα εκ των οποίων θα παρουσιαστούν αναλυτικά στη συνέχεια.

Το τρίτο βήμα ήταν η ανάπτυξη ενός μοντέλου βελτιστοποίησης βάσει μίας αντικειμενικής συνάρτησης και ορισμένους περιορισμούς στους οποίους αυτή θα υπόκειται. Προκειμένου να γίνει βέβαιο ότι το μοντέλο θα λειτουργήσει όπως έχει προβλεφθεί, επαληθεύτηκε, αρχικά, με την εισαγωγή απλών τιμών και στην συνέχεια επεκτάθηκε με περισσότερες και πιο περίπλοκες τιμές, εφόσον διασφαλίστηκε η ορθότητα των αποτελεσμάτων.

Το τέταρτο βήμα ήταν η βελτιστοποίηση των περιπτώσεων που αναλύθηκαν και τέλος, το πέμπτο η λήψη των αποτελεσμάτων τα οποία δείχνουν τις βέλτιστες τοποθεσίες εγκατάστασης των φορτιστών ηλεκτρικών λεωφορείων. Θα ακολουθήσει και περαιτέρω ανάλυση σε επόμενες ενότητες για τα προαναφερθέντα βήματα.

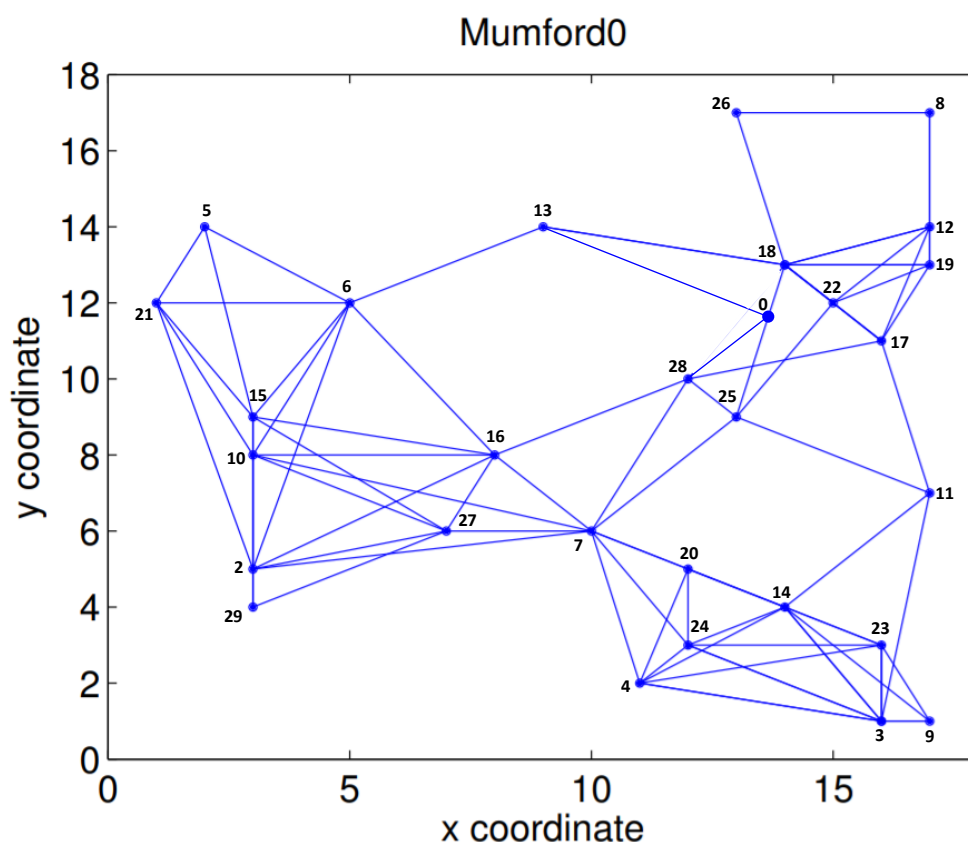
5.1: Η Συλλογή των Δεδομένων

Όπως προαναφέρθηκε, η συλλογή των δεδομένων αποτελεί το πρώτο βήμα της συγκεκριμένης εργασίας. Η συλλογή αυτή περιλαμβάνει δεδομένα τα οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εισόδου στο μοντέλο βελτιστοποίησης που πρόκειται να

αναπτυχθεί. Ελήφθησαν από την σχετική βιβλιογραφία και καθώς το μοντέλο αναπτυσσόταν κατέστη σαφές και ποια δεδομένα εισόδου απαιτούνται. Στη συνέχεια, θα γίνει αναφορά στο δίκτυο που θα εφαρμοστεί το μοντέλο, στα δεδομένα που παρέχονται για το συγκεκριμένο δίκτυο, και στις υποθέσεις που πραγματοποιήθηκαν τόσο για τις τιμές των μεταβλητών όσο και για την διαμόρφωση των διάφορων εξισώσεων του μαθηματικού μοντέλου για την επίλυση του προβλήματος.

5.1.1: Το Δίκτυο Εφαρμογής του Μοντέλου

Το δίκτυο που μελετάται αποτελείται από 30 κόμβους και 90 συνδέσεις και απεικονίζεται στις ακόλουθες εικόνες:



Σχήμα 36: Το τεχνητό δίκτυο αστικών συγκοινωνιών Mumford0 (<https://users.cs.cf.ac.uk/>)

Πρόκειται για ένα τεχνητό δίκτυο αστικών μεταφορών, το όνομα του οποίου είναι «Mumford0» και αποτελείται, όπως προαναφέρθηκε, από 30 σημεία – κόμβους και 90 συνδέσμους, με τον συνολικό αριθμό των διαδρομών να ανέρχεται στις 12 και ο αριθμός των κόμβων ανά διαδρομή να κυμαίνεται από 2 έως 15. Το δίκτυο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην βιβλιογραφία για διάφορες μελέτες που αφορούν την ηλεκτροκίνηση, οπότε και θεωρείται ένα δίκτυο αναφοράς. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, ο αριθμός των κόμβων ανά διαδρομή είναι σταθερός και ισούται με 15. Αξίζει να αναφερθεί, ότι το δίκτυο αυτό αποτελεί ένα από τα αποτελέσματα του ερευνητικού θέματος το οποίο ονομάζεται «Πρόβλημα Δρομολόγησης Αστικών Συγκοινωνιών (Urban Transit Route Problem – UTRP) και περιλαμβάνει τον σχεδιασμό διαδρομών για συστήματα δημόσιων μεταφορών, όπως τα

λεωφορεία ή τα τρένα. Πρόκειται για ένα πολύ περίπλοκο πρόβλημα NP – hard, η επίλυση του οποίου συνεπάγεται πάντοτε έναν κύκλο δημιουργίας και δοκιμής ‘υποψήφιων’ διαδρομών.

Για το δίκτυο Mumford0 είναι διαθέσιμα τα ακόλουθα δεδομένα, χάρη στην ερευνήτρια *Christine Mumford*, από την οποία άντλησε και το όνομα το συγκεκριμένο δίκτυο:

- ♦ Δεδομένα συντεταγμένων του δικτύου: «Mumford0Coords.txt».
- ♦ Δεδομένα ζήτησης του δικτύου: « Mumford0Demand.txt».
- ♦ Δεδομένα χρόνων ταξιδιού στο δίκτυο: «Mumford0TravelTimes.txt».

Από τα παραπάνω αυτά που εισάγονται για την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου είναι μόνο τα δεδομένα χρόνων ταξιδιού του δικτύου. Όσον αφορά την μορφή και τις τιμές των δεδομένων αυτών ισχύουν τα εξής:

- Τα δεδομένα χρόνων ταξιδιού (όπως και τα δεδομένα ζήτησης) για το Mumford0 παρουσιάζονται με την μορφή ενός πίνακα δύο διαστάσεων (2D) με τις γραμμές και τις στήλες να περιέχουν τον αριθμό των κόμβων – από 1 έως 29.
- Ο χρόνος ταξιδιού μεταξύ κάθε ζεύγους κόμβων είναι μετρημένος σε λεπτά. Επίσης, όπου αυτός έχει καταγραφεί ως «Inf» στον δυοδιάστατο πίνακα δείχνει, ότι το ζεύγος αυτό στο οποίο αντιστοιχεί το «Inf» δεν συνδέεται αμέσως.
- Δεν αναγράφεται στα δεδομένα – στους πίνακες – οι αριθμοί των κόμβων. Επίσης, όλοι οι πίνακες είναι συμμετρικοί.

5.1.2: Οι Υποθέσεις του Μοντέλου

Για την ανάπτυξη του προβλήματος, και προκειμένου να είναι δυνατή η ολοκλήρωση του εργασίας, έγιναν οι ακόλουθες υποθέσεις:

1. Εάν τοποθετηθεί φορτιστής γρήγορης φόρτισης σε μία ενδιάμεση στάση μίας λεωφορειακής γραμμής, τότε ο συνολικός χρόνος παραμονής στην στάση μείον τον χρόνο σύνδεσης και αποσύνδεσης του φορτιστή θα χρησιμοποιηθεί για την φόρτιση του λεωφορείου.
2. Τα ηλεκτρικά λεωφορεία του στόλου θα έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά, με μπαταρίες ίσης χωρητικότητας και ίδιες επιδόσεις.
3. Η ενέργεια που θα λαμβάνουν τα λεωφορεία κατά την φόρτιση θα είναι ανάλογη της διάρκειας της φόρτισης.
4. Οι διαδρομές που θα ακολουθούν τα ηλεκτρικά λεωφορεία, ο χρόνος για την μετάβαση από την μία στάση στην άλλη, καθώς και οι στάσεις σε αυτές θα είναι γνωστές.

5. Οι φορτιστές που θα χωροθετηθούν θα είναι διαφορετικής ισχύος. Συγκεκριμένα, θα χωροθετηθούν φορτιστές ισχύος 150 kW στις ενδιάμεσες στάσεις και φορτιστές υψηλότερης ισχύος 450 kW στους τερματικούς σταθμούς.
6. Εάν μία στάση είναι ταυτόχρονα ενδιάμεση για μία συγκεκριμένη γραμμή αλλά και τερματική για μία άλλη γραμμή, θα λαμβάνεται μόνο ως ενδιάμεση για την γραμμή στην οποία είναι ενδιάμεση, και μόνο ως τερματική για την γραμμή στην οποία είναι τερματική.
7. Θεωρείται γνωστή η συχνότητα με την οποία φτάνουν τα λεωφορεία στους τερματικούς σταθμούς.
8. Το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας (State of Charge) θα κυμαίνεται μεταξύ 20 και 80% προκειμένου να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία της σε όλη την διάρκεια της ζωής της.

5.1.2: Η Λειτουργία της Λεωφορειακής Γραμμής

Όσον αφορά το δίκτυο που θα μελετηθεί, θα περιέχει έναν συγκεκριμένο αριθμό λεωφορειακών γραμμών με το κάθε λεωφορείο να εκτελεί μία συγκεκριμένη διαδρομή. Κάθε λεωφορειακή γραμμή περιλαμβάνει τον τερματικό σταθμό, ο οποίος μπορεί να αποτελεί και αφετηρία για μία άλλη γραμμή και αντίστροφα, και τις ενδιάμεσες στάσεις. Στην τερματική στάση με το πέρας του δρομολογίου, θα σταματούν τα ηλεκτρικά λεωφορεία για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και θα φορτίζουν. Σύμφωνα με αυτόν τον κανόνα, βέβαια, στον τερματικό σταθμό θα πρέπει πάντα να είναι εγκατεστημένος φορτιστής, κάτι που είναι λογικό καθώς, σε αυτόν τα λεωφορεία σταματούν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από ότι στις ενδιάμεσες στάσεις. Να σημειωθεί, ότι επειδή με το δίκτυο που θα επιλεγεί μπορεί μία ενδιάμεση στάση σε μία γραμμή να είναι ταυτόχρονα και τέρμα για μία άλλη γραμμή. Δεν θα απαγορεύεται, τότε, η εγκατάσταση φορτιστή ισχύος 150 kW σε αυτή επειδή αποτελεί και τέρμα. Θα δίνεται η δυνατότητα εγκατάστασης τέτοιου φορτιστή και αν τελικά αποφασισθεί η χωροθέτηση του σε στάση με τέτοια ιδιαιτερότητα, το ηλεκτρικό λεωφορείο θα σταματάει κανονικά για μερικά δευτερόλεπτα – όπως σε όλες τις ενδιάμεσες. Λόγω του ότι η στάση αυτή αποτελεί και τέρμα, όμως, θα υπάρχει εγκατεστημένος και φορτιστής ισχύος 450 kW (ένας ή περισσότεροι) για εκείνα τα λεωφορεία όπου η στάση αυτή είναι το τέρμα τους. Με άλλα λόγια, δεν περιορίζει η χωροθέτηση φορτιστή ισχύος 450 kW στην στάση i την χωροθέτηση φορτιστή ισχύος 150 kW στην ίδια στάση. Προκειμένου, όμως, να μην υπάρξουν καθυστερήσεις στην έναρξη των επόμενων κάθε φορά δρομολογίων, λαμβάνεται υπόψιν και ο χρόνος αναμονής των ηλεκτρικών λεωφορείων στις τερματικές στάσεις του δικτύου. Στην περίπτωση όπου μία τερματική στάση είναι κοινή για παραπάνω από μία γραμμές, οπότε και να καταλήγουν σε αυτόν περισσότερα λεωφορεία, ή απλά η άφιξη λεωφορείων σε αυτόν είναι αυξημένη λόγω αυξημένης ζήτησης για παράδειγμα, είναι δυνατόν να εγκατασταθούν περισσότεροι του ενός φορτιστές. Επίσης, λόγω αυτού, θα πρέπει οι φορτιστές που θα εγκατασταθούν σε αυτούς να είναι τέτοιας ισχύος ώστε να μπορούν να εξυπηρετήσουν την ανάγκη σε ενέργεια που θα έχουν τα ηλεκτρικά λεωφορεία φτάνοντας σε αυτούς. Τέλος, όσον αφορά την εκτίμηση του αναμενόμενου χρόνου αναμονής στις τερματικές στάσεις του δικτύου, το μοντέλο ουρών αναμονής που θα χρησιμοποιηθεί είναι το M/M/1. Πράγματι, όταν ένα λεωφορείο φτάνει στην εκάστοτε τερματική στάση του δικτύου, μπορεί να χρειαστεί να περιμένει μέχρι να φορτίσει το προηγούμενο λεωφορείο και στη συνέχεια να

φορτίσει το ίδιο τις μπαταρίες του. Αυτό σημαίνει ότι θα υπάρχει χρόνος αναμονής στην περίπτωση που ένα ηλεκτρικό λεωφορείο είναι ήδη στην τερματική αυτή στάση και φορτίζει. Ως εκ τούτου, ορίζεται ο μέγιστος επιτρεπόμενος χρόνος αναμονής στις τερματικές στάσεις του δικτύου, ο οποίος περιλαμβάνει τον αναμενόμενο χρόνο αναμονής στην ουρά και τον χρόνο εξυπηρέτησης από τον φορτιστή – χρόνο φόρτισης. Ο τελευταίος υπολογίζεται, όπως θα γίνει φανερό και στη συνέχεια, ως ο χρόνος φόρτισης που απαιτείται από κάθε ηλεκτρικό λεωφορείο για την φόρτιση έως και 80% της χωρητικότητας της μπαταρίας του.

5.2: Η Μαθηματική Διαμόρφωση του Προβλήματος

Έχει προαναφερθεί στην παρούσα εργασία ότι το πρόβλημα αυτό της χωροθέτησης αποτελεί πρόβλημα κάλυψης κορυφών. Βασικός στόχος του μαθηματικού μοντέλου που θα προταθεί αποτελεί η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους εγκατάστασης των φορτιστών, υπό τον περιορισμό του χρόνου αναμονής των ηλεκτρικών λεωφορείων στις τερματικές στάσεις του δικτύου εφαρμογής. Ο αναμενόμενος χρόνος αναμονής στην εκάστοτε τερματική στάση του δικτύου θα εκτιμηθεί, όπως προαναφέρθηκε, βάσει του μοντέλου ουρών αναμονής M/M/1.

Για την διατύπωση του προβλήματος είναι απαραίτητος ο καθορισμός των παραμέτρων, συνόλων και μεταβλητών απόφασης. Αυτά παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 1: Σύνολα, παράμετροι και μεταβλητές απόφασης του μαθηματικού μοντέλου

A/A	ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΤΙΜΗ
ΣΥΝΟΛΑ				
1	\bar{R}	Το σύνολο των διαδρομών του δικτύου των ηλεκτρικών λεωφορείων	—	—
2	\bar{S}	Το σύνολο όλων των στάσεων του δικτύου	—	—
3	$\overline{S^{\text{start}}}$	Το σύνολο των αρχικών στάσεων από κάθε διαδρομή	—	—
4	$\overline{S^{\text{middle}}}$	Το σύνολο των ενδιάμεσων στάσεων από κάθε διαδρομή	—	—
5	$\overline{S^{\text{end}}}$	Το σύνολο των τερματικών στάσεων από κάθε διαδρομή	—	—
ΔΕΙΚΤΕΣ				
1	i, j	Σημεία που αντιστοιχούν σε στάσεις λεωφορείου είτε στην αρχή, τέλος της διαδρομής είτε ενδιάμεσα αυτής	—	—
2	R	Η γραμμή του δικτύου	—	—
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ				
1	BC	Η χωρητικότητα της μπαταρίας	kWh	70

2	SOC_{min}	Η ελάχιστη επιτρεπόμενη στάθμη της μπαταρίας	–	20 % = 0.2
3	SOC_{max}	Η μέγιστη επιτρεπόμενη στάθμη της μπαταρίας	–	80 % = 0.8
4	SOC_{in}	Η αρχική στάθμη της μπαταρίας στην αφετηρία της κάθε γραμμής.	–	80 % = 0.8
5	t_c	Ο χρόνος σύνδεσης του φορτιστή - παντογράφου	Seconds	5
6	t_{dc}	Ο χρόνος αποσύνδεσης του φορτιστή - παντογράφου	Seconds	5
7	$dt_{i,R}$	Ο χρόνος παραμονής στην στάση i της διαδρομής R	Seconds	20 ή 40
8	P_f	Η ισχύς του φορτιστή στις τερματικές στάσεις	kW	450
9	P_s	Η ισχύς του φορτιστή στις ενδιάμεσες στάσεις	kW	150
10	avEC	Η μέση κατανάλωση ενέργειας του ηλεκτρικού λεωφορείου	kWh/km	2.5
11	avBusSpeed	Η μέση ταχύτητα του ηλεκτρικού λεωφορείου	km/h	15
12	C_{ef}	Η αποδοτικότητα των φορτιστών	–	90 % = 0.9
13	C_f^{fc}	Το κόστος εγκατάστασης του φορτιστή ισχύος 450 kW	€	150000
14	C_s^{fc}	Το κόστος εγκατάστασης του φορτιστή ισχύος 150 kW	€	80000
15	t	Ο μέγιστος επιτρεπόμενος χρόνος αναμονής στις τερματικές στάσεις	Minutes	8
16	$EC_{ij,R}$	Η κατανάλωση ενέργειας του ηλεκτρικού λεωφορείου για την διάνυση του τμήματος $i - j$ της διαδρομής R	kWh	–
17	$f_{i,R}$	Η συχνότητα με την οποία φτάνουν τα ηλεκτρικά λεωφορεία στην τερματική στάση i της διαδρομής R	Οχήματα / h	–
ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ				
1	$t_{i,R}^{char}$	Ο χρόνος φόρτισης του ηλεκτρικού λεωφορείου στην στάση i της διαδρομής R	Seconds	–
2	$E_{i,R}$	Η ενέργεια του ηλεκτρικού λεωφορείου αναχωρώντας από την στάση i της διαδρομής R	kWh	–
3	$E_{i,R}^{need}$	Η ανάγκη για ενέργεια που θα έχει το ηλεκτρικό λεωφορείο φτάνοντας στην τερματική στάση i της εκάστοτε διαδρομής R	kWh	–

4	AR_i	Ο ρυθμός άφιξης των ηλεκτρικών λεωφορείων στην τερματική στάση i στην διάρκεια μίας ώρας.		–
5	SR_i	Ο ρυθμός εξυπηρέτησης των ηλεκτρικών λεωφορείων στην τερματική στάση i .		–
6	X_i	Δυαδική μεταβλητή, η οποία ισούται με 1, εάν χωροθετηθεί φορτιστής ισχύος (150 kW) στην ενδιάμεση στάση i , αλλιώς ισούται με 0.	–	0 ή 1
7	Y_i	Ακέραια μεταβλητή, η οποία ισούται με 0 έως 3, και δηλώνει τον αριθμό των φορτιστών με ισχύ 450 kW που θα χωροθετηθούν στην τερματική στάση i	–	0 έως 3

Βάσει, λοιπόν, όλων των προαναφερθέντων η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης θα γίνει σύμφωνα με την αντικειμενική συνάρτηση. Στο παρών πρόβλημα θα αναπτυχθούν δύο αντικειμενικές συναρτήσεις. Η πρώτη αντικειμενική συνάρτηση στοχεύει στην βέλτιστη χωροθέτηση των φορτιστών 150 kW στις ενδιάμεσες στάσεις του δικτύου ενώ, η δεύτερη στοχεύει στην βέλτιστη χωροθέτηση των φορτιστών ισχύος 450 kW στις τερματικές στάσεις. Με αυτόν τον τρόπο δείχνεται η συμβολή της κάθε μίας κατηγορίας φορτιστών στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Τα προβλήματα που λύνει η κάθε μία αντικειμενική συνάρτηση δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, καθώς, όπως θα γίνει φανερό και στη συνέχεια, εξαρτάται η χωροθέτηση των φορτιστών ισχύος 450 kW από τον τρόπο με τον οποίο έχουν χωροθετηθεί οι φορτιστές ισχύος 150 kW στις ενδιάμεσες στάσεις του δικτύου (περιορισμός 8).

Έτσι, ισχύουν τα εξής:

$$\text{Min} \left[C_s^{fc} \cdot \sum_{i \in \bar{S}} X_i \right] \quad (5.1)$$

Ο όρος της αντικειμενικής συνάρτησης (5.1) αφορά το κόστος για την εγκατάσταση φορτιστών ισχύος 150 kW σε κάθε ενδιάμεση στάση i . Συγκεκριμένα, εάν εγκατασταθεί φορτιστής 150 kW σε μία ενδιάμεση στάση i , θα κοστίσει ποσό ίσο με C_s^{fc} , και η αντικειμενική αυτή συνάρτηση στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του κόστους αυτού.

Η (5.1) υπόκειται στους ακόλουθους περιορισμούς:

1. Ο παρακάτω περιορισμός αφορά τις στάσεις εκείνες από τις οποίες ξεκινά το ηλεκτρικό λεωφορείο την εκτέλεση του δρομολογίου του, δηλαδή την αφετηρία για κάθε διαδρομή R – που μπορεί να αποτελεί και την τερματική στάση – και εξασφαλίζει ότι το ηλεκτρικό λεωφορείο θα ξεκινά έχοντας τις μπαταρίες του φορτισμένες στο 80 %:

$$E_{i,R} = \text{SOC}_{in} \cdot BC, \quad \forall i \in \overline{S_{start}}, r \in \bar{R} \quad (5.2)$$

2. Ο περιορισμός (5.3) εξασφαλίζει ότι εφόσον χωροθετηθεί φορτιστής σε μία ενδιάμεση στάση i της διαδρομής R , ο χρόνος φόρτισης δεν θα είναι μηδενικός αλλά, και ότι θα περιορίζεται από τον χρόνο παραμονής στην στάση αυτή μείον τον χρόνο σύνδεσης και αποσύνδεσης του φορτιστή:

$$t_{i,R}^{\text{char}} \leq X_i \cdot (dt_{i,R} - t_c - t_{dc}), \quad \forall i \in \overline{S_{\text{middle}}}, r \in \overline{R} \quad (5.3)$$

3. Ο περιορισμός (5.4) αφορά τις ενδιάμεσες στάσεις, ανεξάρτητα από το εάν χωροθετηθεί φορτιστής ή όχι, δηλώνοντας ότι η ενέργεια με την οποία αναχωρεί από την στάση j ισούται με την ενέργεια με την οποία αναχώρησε από την προηγούμενη στάση i , συν την ενέργεια που πήρε κατά την φόρτιση στην i , εάν έχει εγκατασταθεί φορτιστής σε αυτή, μείον την κατανάλωση ενέργειας για την διάνυση του τμήματος $i - j$ της διαδρομής R :

$$E_{j,R} = E_{i,R} + \left(\frac{t_{j,R}^{\text{char}} \cdot P_s \cdot C_{ef}}{3600} \right) - EC_{ij,R}, \quad \forall i, j \in \overline{S_{\text{middle}}}, r \in \overline{R} \quad (5.4)$$

4. Ο περιορισμός (5.5) εξασφαλίζει την προστασία της ζωής της μπαταρίας, αλλά και την δυνατότητα του λεωφορείου να συνεχίσει το δρομολόγιό του προς την επόμενη στάση, καθώς περιορίζει την εναπομείνουσα ενέργεια στην μπαταρία έπειτα της αναχώρησης από την στάση i από το να μην είναι μικρότερη από την ελάχιστη επιτρεπόμενη στάθμη που έχει οριστεί ίση με το 20 % συν την ενέργεια που χρειάζεται το ηλεκτρικό λεωφορείο προκειμένου να φτάσει στην επόμενη στάση j :

$$E_{i,R} \geq EC_{ij,R} + (SOC_{\text{min}} \cdot BC), \quad \forall i \in \overline{S}, r \in \overline{R} \quad (5.5)$$

5. Ο περιορισμός (5.6) εξασφαλίζει και αυτός την προστασία της ζωής της μπαταρίας περιορίζοντας την ενέργεια μετά την αναχώρηση από την στάση i από το να μην ξεπεράσει την μέγιστη επιτρεπόμενη στάθμη, η οποία ισούται με 80 %:

$$E_{i,R} \leq SOC_{\text{max}} \cdot BC, \quad \forall i \in \overline{S}, r \in \overline{R} \quad (5.6)$$

6. Ο περιορισμός (5.7) ορίζει την μεταβλητή χωροθέτησης X_i ως δυαδική για τις ενδιάμεσες στάσεις:

$$X_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \overline{S_{\text{middle}}} \quad (5.7)$$

7. Ο περιορισμός (5.8) εξασφαλίζει ότι δεν θα χωροθετηθεί κανένας φορτιστής ισχύος 150 kW σε τερματική στάση:

$$X_i = 0, \quad \forall i \in \overline{S_{\text{start}}}, \overline{S_{\text{end}}} \quad (5.8)$$

Η μαθηματική διατύπωση της δεύτερης αντικειμενικής συνάρτησης γίνεται ως εξής:

$$\text{Min} \left[C_f^{\text{fc}} \cdot \sum_{i \in \overline{S_{\text{end}}}} Y_i \right] \quad (5.9)$$

Ο όρος της αντικειμενικής συνάρτησης (5.9) αφορά το κόστος για την εγκατάσταση φορτιστών ισχύος 450 kW στην εκάστοτε τερματική στάση i . Συγκεκριμένα, εάν εγκατασταθεί φορτιστής 450 kW σε μία τερματική στάση i , θα κοστίζει ποσό ίσο με C_f^{fc} , και η αντικειμενική αυτή συνάρτηση στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του κόστους αυτού.

Η (5.11) υπόκειται στους ακόλουθους περιορισμούς:

8. Ο περιορισμός (5.10) δηλώνει την ενέργεια με την οποία φτάνει το ηλεκτρικό λεωφορείο στην τερματική στάση i της κάθε διαδρομής R :

$$E_{j,R}^{\text{terminal}} = E_{i,R}^{\text{Before terminal}} - EC_{ij,R}, \quad \forall j \in \overline{S_{\text{end}}}, r \in \overline{R} \quad (5.10)$$

9. Ο περιορισμός (5.11) δηλώνει την ενέργεια που χρειάζεται το ηλεκτρικό λεωφορείο να πάρει κατά την φόρτιση, όταν αυτό φτάνει στην τερματική στάση, έως ότου το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας να ισούται με το 80% της συνολικής χωρητικότητας της. Η ανάγκη αυτή πολλαπλασιάζεται με την συχνότητα με την οποία φτάνουν τα ηλεκτρικά λεωφορεία στο τέρμα της κάθε διαδρομής ώστε, να προκύψει η συνολική ανάγκη για ενέργεια:

$$E_{i,R}^{\text{need}} = [(SOC_{\text{max}} \cdot BC) - E_{i,R}^{\text{terminal}}] \cdot f_{i,R}, \quad \forall i \in \overline{S_{\text{end}}}, r \in \overline{R}: EC_{ij,R} > 0, j \in \overline{S_{\text{middle}}} \quad (5.11)$$

10. Ο περιορισμός (5.12) ορίζει την ακέραια μεταβλητή χωροθέτησης Y_i για τις τερματικές στάσεις του δικτύου:

$$Y_i \in \{0, 3\}, \quad \forall i \in \overline{S_{\text{end}}} \quad (5.12)$$

11. Ο περιορισμός (5.13) ορίζει τον ρυθμό εξυπηρέτησης στις τερματικές στάσεις, ο οποίος αποτελεί το γινόμενο του αριθμού των φορτιστών που χωροθετήθηκαν στην εκάστοτε τερματική στάση i επί την ισχύ των φορτιστών σε αυτές. Ο ρυθμός εξυπηρέτησης, δηλαδή, διαφέρει ανάλογα με τον αριθμό των φορτιστών που τελικά θα εγκατασταθούν στην τερματική στάση i . Με τον περιορισμό αυτό, δηλαδή, προσεγγίζεται η έννοια της εξυπηρέτησης με την παρεχόμενη ισχύ που προσφέρεται στο τέρμα της κάθε διαδρομής, ανάλογα τον αριθμό των φορτιστών που θα χωροθετηθούν:

$$SR_i = Y_i \cdot P_f, \quad \forall i \in \overline{S_{\text{end}}} \quad (5.13)$$

12. Ο περιορισμός (5.14) ορίζει τον ρυθμό άφιξης στις τερματικές στάσεις. Η έννοια της άφιξης στην συγκεκριμένη περίπτωση προσεγγίζεται με την «άφιξη» της ενέργειας που χρειάζεται το κάθε ηλεκτρικό λεωφορείο φτάνοντας στο τέρμα της διαδρομής του έως ότου φτάσει το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας στο 80%:

$$AR_i = \sum_{\overline{R}: EC_{ij,R} > 0, j \in \overline{S_{\text{middle}}}} E_{i,R}^{\text{need}}, \quad \forall i \in \overline{S_{\text{end}}} \quad (5.14)$$

13. Ο περιορισμός (5.15) εξασφαλίζει την δυνατότητα της εξυπηρέτησης των ηλεκτρικών λεωφορείων στις τερματικές στάσεις. Εάν, δηλαδή, η παρεχόμενη ισχύς από τους

φορτιστές στο τέρμα της κάθε διαδρομής είναι ικανή να καλύψει τις ανάγκες για ενέργεια των ηλεκτρικών λεωφορείων που φτάνουν σε αυτό, σε χρόνο τέτοιο ο οποίος να μην ξεπερνάει το ανώτατο επιτρεπόμενο όριο του χρόνου αναμονής που έχει οριστεί.

$$SR_i - AR_i \geq \frac{1}{t} \cdot Y_i, \quad \forall i \in \overline{S_{end}} \quad (5.15)$$

Όπως είναι γνωστό, ο αναμενόμενος χρόνος αναμονής σε ένα σύστημα, με βάση το σύστημα ουρών αναμονής M/M/1 το οποίο αξιοποιείται και στην παρούσα μελέτη, δίνεται από την σχέση (Hillier and Lieberman, 1995):

$$\frac{1}{\mu - \lambda}$$

Ο αναμενόμενος χρόνος αναμονής καλύπτει τόσο τον χρόνο αναμονής στην ουρά, όσο και τον αναμενόμενο χρόνο εξυπηρέτησης ($1/\mu$). Γίνεται η υπόθεση ότι ο χρόνος αναμονής αυτός δεν θα πρέπει να ξεπερνάει ένα ανώτερο όριο, καθώς αν συμβεί αυτό θα υπάρξουν πιθανές καθυστερήσεις στην έναρξη της εκτέλεσης των δρομολογίων και επομένως, μία δυσαρέσκεια – ενόχληση από τους επιβάτες. Με την εγκατάσταση, λοιπόν, ενός ή δύο φορτιστών στις τερματικές στάσεις, θα πρέπει να ικανοποιείται ο ακόλουθος περιορισμός:

$$\frac{1}{\mu - \lambda} \leq t$$

Βέβαια, εάν εισαχθεί στο μοντέλο ο παραπάνω περιορισμός στην συγκεκριμένη μορφή, θα μετατρέψει το μοντέλο σε μη γραμμικό. Για αυτό το λόγο ο περιορισμός αυτός λαμβάνει την μορφή (5.15). Προφανώς, ο περιορισμός αυτός είναι έγκυρος μόνο στην περίπτωση που εγκατασταθεί φορτιστής στην τερματική στάση i . Τέτοιο πρόβλημα, βέβαια, δεν υφίσταται στην περίπτωση του μοντέλου καθώς, έχει γίνει σαφές ότι σε κάθε τερματική στάση i θα χωροθετηθεί τουλάχιστον ένας φορτιστής. Στην περίπτωση, όμως, που δεν είχε οριστεί κάτι τέτοιο και η μεταβλητή απόφασης για την χωροθέτηση φορτιστών στις τερματικές στάσεις ήταν δυαδική (0 ή 1) και όχι ακέραια, αν έπειτα της λύσης του προβλήματος δεν είχε εγκατασταθεί κανένας φορτιστής στην τερματική στάση i , τότε το δεξί μέρος του περιορισμού (5.15) θα ήταν ίσο με μηδέν, και επειδή λόγω του περιορισμού (5.13) το SR_i θα ήταν και αυτό ίσο με μηδέν, θα αναγκαζόταν και το AR_i να ήταν ίσο με μηδέν, οδηγώντας στο αποτέλεσμα ότι κανένα λεωφορείο δεν είναι δυνατόν να φορτίσει στην τερματική στάση i .

Όσον αφορά τις τιμές που έλαβαν οι παράμετροι του μαθηματικού μοντέλου, αυτές τέθηκαν βάσει αυτών που αναγράφονται στην σχετική βιβλιογραφία αλλά, και βάσει ορισμένων από τις υποθέσεις που προαναφέρθηκαν.

Συγκεκριμένα:

1. Η Χωρητικότητα της Μπαταρίας – BC (Battery Capacity):

Οι *Kunith et al. (2017)* στην μελέτη τους υπολόγισαν την χωρητικότητα της μπαταρίας που είναι απαραίτητη για ένα τυπικό λεωφορείο δώδεκα μέτρων (12 m – SB), για ένα αρθρωτό λεωφορείο δεκαοχτώ μέτρων (18 m – AB) και για ένα διώροφο λεωφορείο (DD). Ο τύπος μπαταριών που θα χρησιμοποιούσαν είναι ιόντων – λιθίου και στην ανάλυση που πραγματοποίησαν προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για τους τρεις τύπους λεωφορείων:

- Για τυπικό λεωφορείο 12 m: 60, 90 και 120 kWh.
- Για το αρθρωτό λεωφορείο 18 m και για το διώροφο: 90, 120 και 150 kWh.

Βάσει αυτών των τιμών, λοιπόν, και της υπόθεσης ότι ο στόλος των λεωφορείων θα αποτελείται από λεωφορεία 12 m, επιλέχθηκε μία τιμή χωρητικότητας μπαταρίας ίση με 70 kWh. Βέβαια, η τιμή αυτή θα μεταβληθεί στην ανάλυση ευαισθησίας που θα πραγματοποιηθεί στην συνέχεια, προκειμένου να γίνει φανερό πως αυτή επηρεάζει τον αριθμό των φορτιστών αλλά, και το σε ποια στάση θα τοποθετηθούν.

2. Η Μέση Κατανάλωση Ενέργειας και η Μέση Ταχύτητα:

Οι *Rogge et al. (2015)* στη μελέτη τους για συγκεκριμένο δίκτυο λεωφορειακών γραμμών έλαβαν υπόψιν τους διάφορες παραμέτρους που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας (προφίλ της εκάστοτε διαδρομής, λειτουργία κλιματισμού – καλοριφέρ, μήκος και βάρος λεωφορείου, μέση ταχύτητα λεωφορείου) και κατέληξαν σε μία ελάχιστη τιμή κατανάλωσης ενέργειας ίση με 2.26 kWh/km και μία μέγιστη ίση με 2.69 kWh/km, με την μέση τιμή να ισούται με 2.47 kWh/km. Οπότε, για την παρούσα μελέτη λαμβάνεται μία μέση τιμή κατανάλωσης ενέργειας ίση με 2.5 kWh/km αλλά, και μία μέση ταχύτητα ίση με 15 km/h, σύμφωνα με την ίδια μελέτη.

3. Ελάχιστο (SOC_{min}) και μέγιστο (SOC_{max}) επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας:

Τόσο το ελάχιστο όσο και το μέγιστο επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας είναι καλό να ικανοποιούν ορισμένα όρια. Η χωρητικότητα μίας μπαταρίας ιόντων – λιθίου δεν είναι σταθερή σε όλη την διάρκεια της ζωής της. Βαίνει μειούμενη λόγω της χρήσης της. Επομένως, στην διαστασιολόγηση του μεγέθους της μπαταρίας σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν και τα επίπεδα φόρτισης αυτής. Οι *Rogge et al. (2015)* έκριναν επιτρεπτό ένα ανώτερο όριο φόρτισης ίσο με το 80% και ένα ελάχιστο ίσο με το 20% της συνολικής χωρητικότητας της μπαταρίας, οπότε και λαμβάνονται οι ίδιες τιμές για την συγκεκριμένη μελέτη.

4. Χρόνος Παραμονής του Ηλεκτρικού Λεωφορείου στη Στάση:

Ο χρόνος παραμονής του ηλεκτρικού λεωφορείου στη στάση είναι καθοριστικός παράγοντας για την ενέργεια που αυτό θα αντλήσει από τον φορτιστή – εάν έχει εγκατασταθεί – σε αυτή. Ο χρόνος αυτός συνήθως κυμαίνεται ανάμεσα σε 0.5 και 2 λεπτά. Στη συγκεκριμένη ανάλυση λήφθηκαν υπόψιν οι στάσεις μετεπιβίβασης, οι οποίες είναι οι κοινές στάσεις ανά δύο διαδρομές. Αναλυτικότερα, σε αυτές όπου σταματούν λεωφορεία όχι μόνο από μία αλλά από περισσότερες διαδρομές ο χρόνος παραμονής στη στάση θα είναι μεγαλύτερος. Για τις στάσεις μη μετεπιβίβασης, επομένως, ο χρόνος παραμονής ισούται με 20 δευτερόλεπτα (*Rogge et al. (2015)*), ενώ για τις μετεπιβίβασης ίσος με 40 δευτερόλεπτα. Βάσει, λοιπόν, αυτού και θεωρώντας χρόνο σύνδεσης και αποσύνδεσης του παντογράφου ίσο με 5 δευτερόλεπτα, ο χρόνος φόρτισης του λεωφορείου – σύμφωνα και με τον περιορισμό 2 – μπορεί να πάρει τιμή έως και 30 δευτερόλεπτα.

5. Ισχύς Φορτιστή:

Πρόκειται για μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους του μοντέλου και μπορεί να καθορίσει την ενέργεια που θα αντλεί το ηλεκτρικό λεωφορείο κατά την φόρτισή του, το

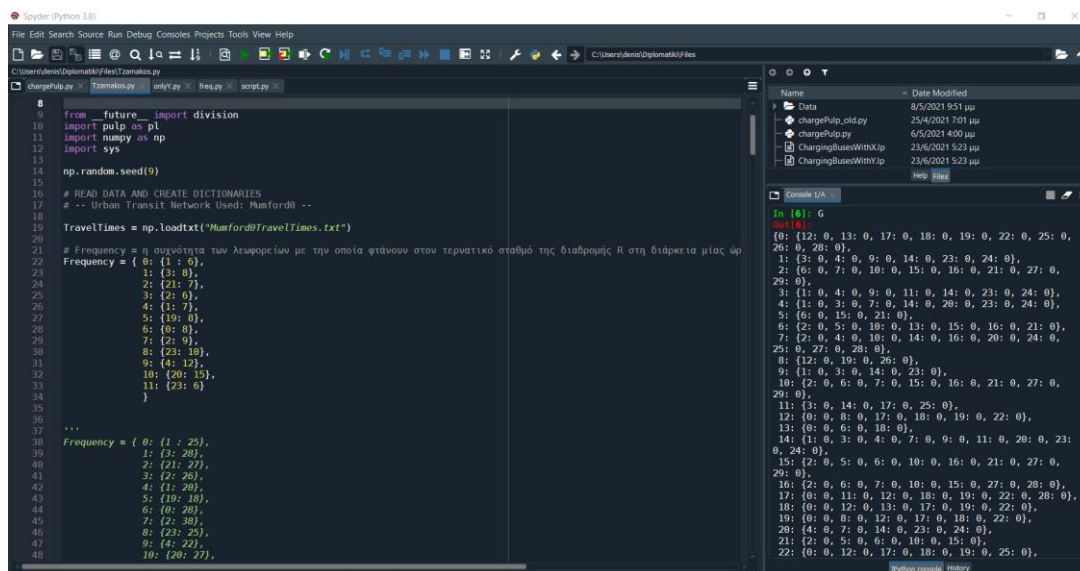
χρόνο που χρειάζεται να φορτίσει έως ένα συγκεκριμένο ποσοστό, το κόστος λειτουργίας του δικτύου και την τελική χωρητικότητα της μπαταρίας. Όσο πιο υψηλή είναι η παρεχόμενη ισχύς από τον φορτιστή τόσο πιο μικρή μπορεί να είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας με αποτέλεσμα περισσότερος χώρος για τους επιβάτες – *Antti Lajunen et al. (2016)*. Βέβαια, το κόστος της επένδυσης αυξάνεται και επιβαρύνεται και το ηλεκτρικό δίκτυο της περιοχής. Όπως έχει προαναφερθεί, στη παρούσα μελέτη πρόκειται να γίνει εγκατάσταση φορτιστών διαφορετικής ισχύος στις ενδιάμεσες στάσεις και στο τέρμα της εκάστοτε διαδρομής. Θεωρήθηκε ισχύς φορτιστή ίση με 150 kW για τους φορτιστές στις ενδιάμεσες στάσεις και ισχύς ίση με 450 kW για τους φορτιστές στους τερματικούς σταθμούς.

6. Κόστος Φορτιστών:

Σύμφωνα και με τους *Yi He, Ziqi Song et al. (2018)* θεωρήθηκε κόστος για τον φορτιστή ισχύος 150 kW ίσο με 80000 € και για τον φορτιστή ισχύος 450 kW ίσο με 150000 €.

5.3: Το Περιβάλλον Επίλυσης του Προβλήματος

Για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος αναπτύχθηκε κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού Python 3 με την βοήθεια του προγραμματιστικού περιβάλλοντος *Anaconda Navigator 3.0 – Spyder 3.8* και της βιβλιοθήκης *Pulp* της Python, και εκτελέστηκε σε υπολογιστή με επεξεργαστή 2.9 GHZ και μνήμη RAM 8 GB. Το μοντέλο που παρουσιάστηκε παραπάνω είναι μοντέλο βελτιστοποίησης ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. Ο ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός είναι μία βασική τεχνική για την επίλυση διακριτών προβλημάτων βελτιστοποίησης, όπως το συγκεκριμένο που στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης της υποδομής φόρτισης δεδομένων κάποιων περιορισμών.



Σχήμα 37: Το προγραμματιστικό περιβάλλον Spyder 3.8

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Τα Αποτελέσματα

Η επίλυση του προβλήματος που έχει αναπτυχθεί πραγματοποιήθηκε για το δεδομένο δίκτυο Mumford0 12 διαδρομών. Τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν στην συνέχεια προέκυψαν βάσει των αρχικών βασικών τιμών που έλαβαν οι παράμετροι 1 έως 8 και η παράμετρος 21, η οποία αφορά τις συχνότητες με τις οποίες φτάνουν τα ηλεκτρικά λεωφορεία στο τέρμα της κάθε γραμμής. Αυτές παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 2: Συχνότητα των ηλεκτρικών λεωφορείων στις τερματικές στάσεις ανά γραμμή

Γραμμή - Τερματικός	Συχνότητα (οχήματα / h)
Γραμμή 0 – Τερματικός 1	11
Γραμμή 1 – Τερματικός 3	9
Γραμμή 2 – Τερματικός 21	10
Γραμμή 3 – Τερματικός 2	6
Γραμμή 4 – Τερματικός 1	7
Γραμμή 5 – Τερματικός 19	8
Γραμμή 6 – Τερματικός 0	8
Γραμμή 7 – Τερματικός 2	9
Γραμμή 8 – Τερματικός 23	10
Γραμμή 9 – Τερματικός 4	5
Γραμμή 10 – Τερματικός 20	11
Γραμμή 11 – Τερματικός 23	6

Τα αποτελέσματα από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο δίκτυο Mumford0 παρουσιάζονται παρακάτω;

Πίνακας 3: Τα αποτελέσματα του μοντέλου βελτιστοποίησης

ΔΙΚΤΥΟ Mumford0	
Αρχικές Βασικές Τιμές Παραμέτρων του Προβλήματος Χωροθέτησης Εγκαταστάσεων	Συνολικός Αριθμός Φορτιστών σε Ενδιάμεσες Στάσεις (X_i)
BC = 70 kWh	
SOC _{min} = 0.20	Χωροθετήθηκαν συνολικά 2 φορτιστές ισχύος 150 kW
SOC _{max} = 0.80	
SOC _{in} = 0.80	
t _c = 5 sec.	
t _{dc} = 5 sec.	
dt _{i,R} = 40 sec.	Συνολικός Αριθμός Φορτιστών σε Τερματικές Στάσεις (Y_i)
P _f = 450 kW	
P _s = 150 kW	
avEC = 2.5 kWh/km	
avBusSpeed = 15 km/h	

$C_{ef} = 0.90$	Χωροθετήθηκαν συνολικά 12 φορτιστές ισχύος 450 kW
$C_f^{fc} = 150000 \text{ €}$	
$C_s^{fc} = 80000 \text{ €}$	
$t = 8 \text{ min.}$	
Συνολικό Κόστος – Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης Z (5.1 + 5.9)	1816000 €

Οι στάσεις του δικτύου στις οποίες πρόκειται να εγκατασταθούν οι φορτιστές προκειμένου αυτό να εξυπηρετείται από τα ηλεκτρικά λεωφορεία, καθώς και ο αριθμός αυτών, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4: Αριθμός και τύπος φορτιστών ανά στάση

Στάση Εγκατάστασης Φορτιστή	Αριθμός Φορτιστών
Ενδιάμεσες Στάσεις Δικτύου	
15 – γραμμή 0	1 x 150 kW
27 – γραμμή 0	1 x 150 kW
Τερματικές Στάσεις Δικτύου	
0	1 x 450 kW
1	2 x 450 kW
19	1 x 450 kW
2	2 x 450 kW
20	1 x 450 kW
21	1 x 450 kW
23	2 x 450 kW
3	1 x 450 kW
4	1 x 450 kW

Να σημειωθεί ότι σε όσες τερματικές στάσεις έχουν εγκατασταθεί άνω του ενός φορτιστές ισχύος 450 kW, αυτές αποτελούν τερματικές στάσεις για παραπάνω της μίας γραμμής ηλεκτρικού λεωφορείου. Συγκεκριμένα, η στάση 1 αποτελεί τερματική στάση για την γραμμή 0 και την 4, η στάση 2 για την γραμμή 3 και την 7 και η στάση 23 για την γραμμή 8 και την 11.

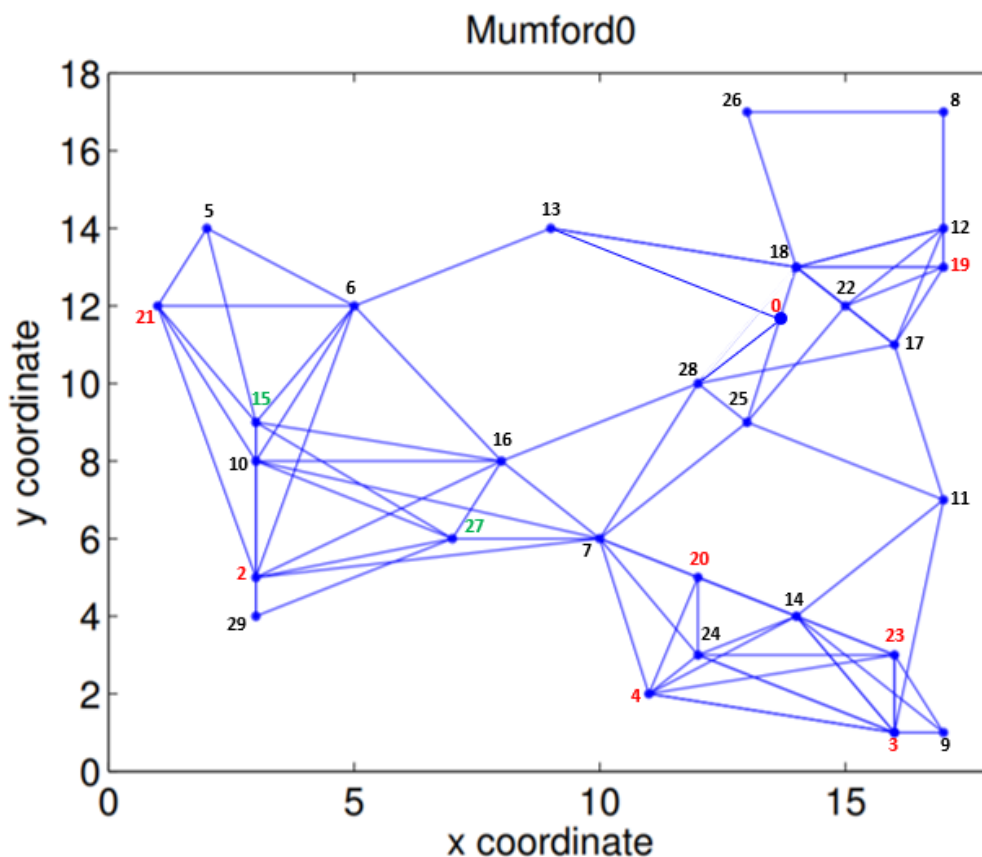
Όσον αφορά τον χρόνο φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων στις παραπάνω στάσεις, αυτός φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5: Χρόνος φόρτισης ηλεκτρικού λεωφορείου ανά στάση

Στάση Εγκατάστασης Φορτιστή	Χρόνος Φόρτισης
Ενδιάμεσες Στάσεις Δικτύου	
15 – γραμμή 0	17 sec.
27 – γραμμή 0	30 sec.
Τερματικές Στάσεις Δικτύου	
0	4.8 min.
1 – γραμμή 0	5.6 min.
1 – γραμμή 4	5.6 min.
2 – γραμμή 3	4.8 min.

2 – γραμμή 7	5.2 min.
3	4.5 min.
4	5 min.
19	5.4 min.
20	5 min.
21	4.2 min.
23 – γραμμή 8	5.2 min.
23 – γραμμή 11	4.9 min.

Στην παρακάτω εικόνα, οι κόκκινες στάσεις είναι οι τερματικές στις οποίες χωροθετήθηκε φορτιστής ισχύος 450 kW και οι πράσινες είναι οι ενδιάμεσες στάσεις στις οποίες χωροθετήθηκε φορτιστής ισχύος 150 kW:



Σχήμα 38: Απεικόνιση των στάσεων εγκατάστασης φορτιστή

Στη στάση 15 της γραμμής 0, λοιπόν, το ηλεκτρικό λεωφορείο θα φορτίσει για χρόνο ίσο με 17 δευτερόλεπτα. Ο χρόνος αυτός δεν περιλαμβάνει, όπως έχει προαναφερθεί, τον χρόνο σύνδεσης και αποσύνδεσης του φορτιστή, ο οποίος είναι ίσος με 10 δευτερόλεπτα. Επομένως, ο χρόνος για τον οποίο θα είναι σταματημένο το λεωφορείο στη στάση αυτή θα ισούται με 27 δευτερόλεπτα, ο οποίος είναι επιτρεπτός, καθώς έχει γίνει η υπόθεση ότι ο μέγιστος χρόνος παραμονής ενός λεωφορείου στην στάση είναι ίσος με 40 δευτερόλεπτα. Επίσης, όσον αφορά τις τερματικές στάσεις ο χρόνος φόρτισης πρέπει να είναι μικρότερος του ανώτερου επιτρεπόμενου ορίου του χρόνου αναμονής σε αυτή, ο οποίος χρόνος αναμονής περιλαμβάνει και τον χρόνο αναμονής στην ουρά αλλά, και τον χρόνο εξυπηρέτησης του ηλεκτρικού λεωφορείου από τον φορτιστή. Η ικανοποίηση του περιορισμού 13, άλλωστε, δηλώνει ακριβώς αυτό.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί, ότι στις τερματικές στάσεις παρόλο που η ακέραια μεταβλητή απόφασης έχει οριστεί να λαμβάνει τιμές από 0 έως και 3, το πρόβλημα δεν επέλεξε σε κάποια από αυτές να εγκατασταθούν 3 που αποτελεί το ανώτατο όριο. Αυτό είναι θετικό και εύλογο, μιας και πρόκειται για ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, που αποσκοπεί, όπως έχει προαναφερθεί, στην ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης και με αυτόν τον τρόπο φαίνεται η ορθότητα της λειτουργίας του μοντέλου και των αποτελεσμάτων που προκύπτουν.

6.1: Ανάλυση Ευαισθησίας των Παραμέτρων

Στο παρών υποκεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί μία ανάλυση ευαισθησίας προκειμένου να αναλυθεί το πως επηρεάζει η αλλαγή των αρχικών - βασικών τιμών των παραμέτρων του προβλήματος τον αριθμό των φορτιστών που πρόκειται να εγκατασταθούν. Άλλωστε, η ποιότητα της λύσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις παραδοχές που έχουν πραγματοποιηθεί για τις τιμές των διαφόρων παραμέτρων του μαθηματικού μοντέλου. Στη συνέχεια, λοιπόν, θα αναλυθούν οι επιπτώσεις από την μεταβολή των τιμών των ακόλουθων παραμέτρων:

1. Ελάχιστη επιτρεπόμενη στάθμη της μπαταρίας (SOC_{min}).
2. Μέγιστη επιτρεπόμενη στάθμη της μπαταρίας (SOC_{max}).
3. Η αρχική στάθμη της μπαταρίας (SOC_{in}).
4. Η χωρητικότητα της μπαταρίας (BC).
5. Η ισχύς των φορτιστών στις ενδιάμεσες στάσεις (P_s).
6. Η ισχύς των φορτιστών στις τερματικές στάσεις (P_f).
7. Το εύρος τιμών της ακέραιας μεταβλητής απόφασης Y_i .
8. Η συχνότητα με την οποία φτάνουν τα ηλεκτρικά λεωφορεία στο τέρμα της κάθε γραμμής ($f_{i,R}$).

Όπως θα γίνει φανερό και στην συνέχεια, δεν θα μεταβάλλονται μεμονωμένα μόνο οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων. Υπάρχει περίπτωση, δηλαδή, να εξεταστεί το πως επηρεάζεται η χωροθέτηση φορτιστών στις ενδιάμεσες στάσεις – ο αριθμός αυτών – με την αλλαγή ταυτόχρονα της παραμέτρου SOC_{max} και της ισχύς φόρτισης P_s , αλλά και παραπάνω από δύο ταυτόχρονα.

6.1.1: Μεταβολή του Ποσοστού SOC_{min}

Αρχικά, μεταβάλλεται η τιμή του ποσοστού SOC_{min} από 20% που είχε οριστεί ως η βασική σε 30%, προκειμένου να φανεί το πως αυτή επηρεάζει τον αριθμό των φορτιστών που θα εγκατασταθούν αλλά, και σε ποιες στάσεις. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι απαιτείται η εγκατάσταση 9 παραπάνω φορτιστών ισχύος 150 kW στις ενδιάμεσες στάσεις του δικτύου, χωρίς, όμως, να μεταβάλλεται ο αριθμός των φορτιστών που απαιτούνται στις τερματικές – παραμένει ίσος με 12.

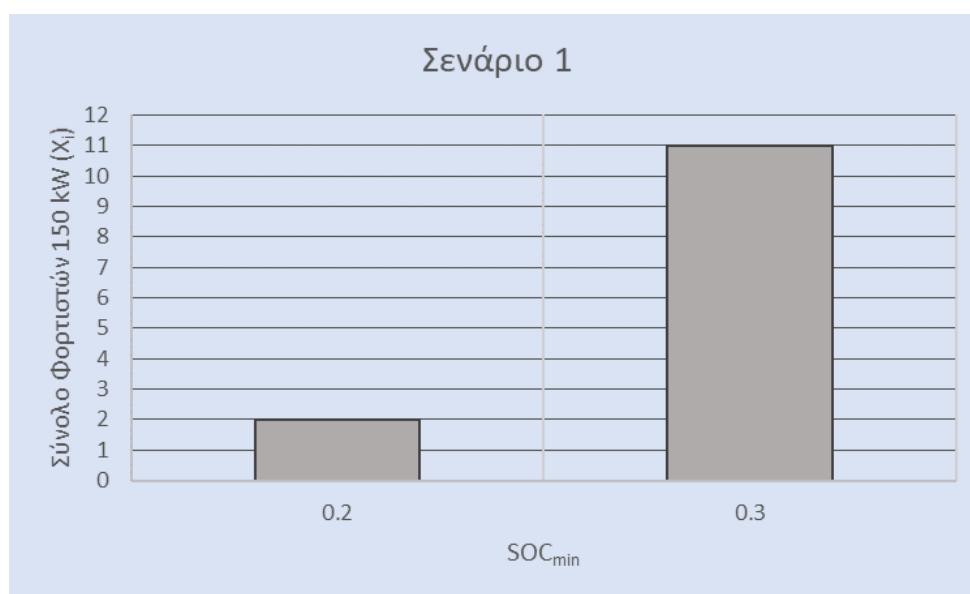
Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό, καθώς προκειμένου να διατηρηθεί ακόμα υψηλότερο το ελάχιστο επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας θα χρειάζεται και πιο συχνή φόρτιση το ηλεκτρικό λεωφορείο.

Συγκεκριμένα:

Πίνακας 6: Αποτελέσματα σεναρίου 1

Τιμή Παραμέτρου	Στάσεις Εγκατάστασης Φορτιστή 150 kW	Σύνολο
$SOC_{min} = 20\%$	15, 27	2
$SOC_{min} = 30\%$	0, 10, 15, 22, 24, 26, 28, 29, 4, 6, 7	11

Η αύξηση αυτή αναπαρίσταται και διαγραμματικά:



Σχήμα 39: Διαγραμματική αναπαράσταση Σεναρίου 1

6.1.2: Μεταβολή του Ποσοστού SOC_{min} και της Χωρητικότητας Μπαταρίας BC

Μεταβάλλοντας την παράμετρο SOC_{min} από 30 σε 40% μεμονωμένα, διατηρώντας τις τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων ίδιες, ο αλγόριθμος δεν καταλήγει σε κάποια λύση. Για αυτό το λόγο μεταβάλλεται η τιμή του SOC_{min} σε συνδυασμό με την μεταβολή της τιμής της

χωρητικότητα της μπαταρίας BC. Είναι αναμενόμενο, βέβαια, πως διατηρώντας το μέγεθος της μπαταρίας ίδιο (ίσο με 70 kWh) και κάνοντας πιο αυστηρό τον περιορισμό του ελάχιστου επιτρεπόμενου ορίου της μπαταρίας, καθίσταται δύσκολο, έως ακατόρθωτο, ένα ηλεκτρικό λεωφορείο να βγάλει εις πέρας το δρομολόγιό του. Μεταβάλλοντας, λοιπόν, το SOC_{min} από 20 σε 30% και την χωρητικότητα της μπαταρίας από τις 70 στις 80 kWh, προκύπτει ότι απαιτείται η εγκατάσταση 2 επιπλέον φορτιστών ισχύος 150 kW στις ενδιάμεσες στάσεις του δικτύου, χωρίς, όμως, να μεταβάλλεται ο αριθμός των φορτιστών που απαιτούνται στις τερματικές – παραμένει ίσος με 12. Επίσης, μεταβάλλοντας το SOC_{min} από 30% σε 40% αλλά, και την χωρητικότητα της μπαταρίας από 80 kWh σε 90 kWh προκύπτει ότι απαιτείται η εγκατάσταση 7 επιπλέον φορτιστών ισχύος 150 kW στις ενδιάμεσες στάσεις του δικτύου.

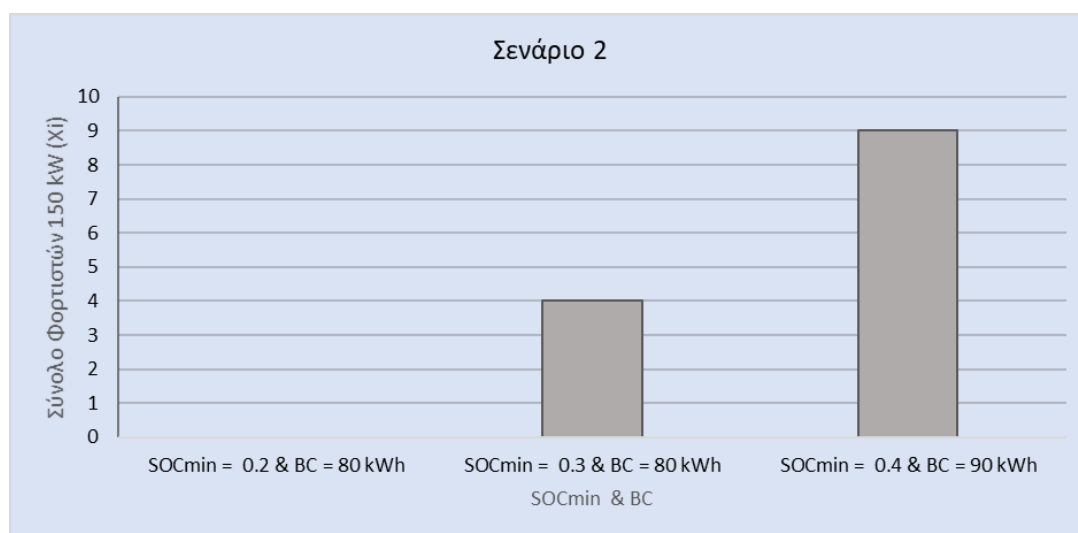
Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι παρόλη την αύξηση της χωρητικότητας της μπαταρίας από 80 σε 90 kWh, ο πιο αυστηρός περιορισμός της αύξησης του SOC_{min} από 30 σε 40% επηρεάζει περισσότερο τον αλγόριθμο, και χρήζουν εγκατάστασης περισσότεροι φορτιστές, ώστε να είναι εφικτή η περάτωση των δρομολογίων από τα ηλεκτρικά λεωφορεία.

Συγκεκριμένα:

Πίνακας 7: Αποτελέσματα σεναρίου 2

Τιμή Παραμέτρου	Στάσεις Εγκατάστασης Φορτιστή 150 kW	Σύνολο
SOC _{min} = 20% & BC = 80 kWh	—	0
SOC _{min} = 30% & BC = 80 kWh	28, 29, 4, 7	4
SOC _{min} = 40% & BC = 90 kWh	0, 15, 16, 2, 27, 29, 3, 4, 7	9

Τα αποτελέσματα του σεναρίου 2 αναπαρίστανται και διαγραμματικά:



Σχήμα 40: Διαγραμματική αναπαράσταση Σεναρίου 2

6.1.3: Μεταβολή της Χωρητικότητας Μπαταρίας BC

Διατηρώντας το ελάχιστο επιτρεπόμενο επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας ίσο με 20% και αυξάνοντας την χωρητικότητα της μπαταρίας από 70 σε 80 kWh προκύπτει, ότι δεν απαιτείται η εγκατάσταση φορτιστών ισχύος 150 kW στις ενδιάμεσες στάσεις του δικτύου. Μειώνοντας την χωρητικότητα της μπαταρίας από 70 kWh σε 60 kWh, βέβαια, προκύπτει ότι απαιτείται η εγκατάσταση επιπλέον 7 φορτιστών στις ενδιάμεσες στάσεις του δικτύου. Και στις δύο περιπτώσεις ο αριθμός των φορτιστών ισχύος 450 kW στις τερματικές στάσεις παραμένει ίσος με 12.

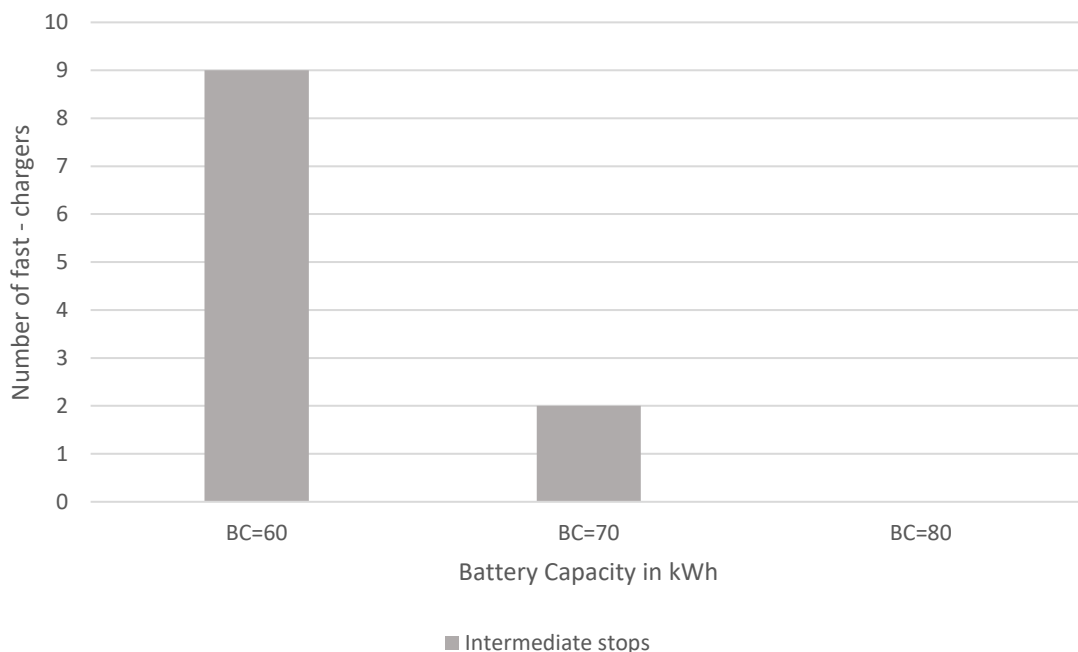
Βάσει των αποτελεσμάτων αυτών, επομένως, γίνεται φανερό ότι δεν υπάρχει λόγος μείωσης της χωρητικότητας της μπαταρίας κατά 10 kWh, καθώς οι φορτιστές που απαιτούνται είναι περισσότεροι. Βέβαια, το σενάριο με την χωρητικότητα μπαταρίας στις 80 kWh, μπορεί να συμβάλλει θετικά στην υλοποίηση της συγκεκριμένης μελέτης, εάν το κόστος της μπαταρίας υψηλότερης χωρητικότητας δεν υπερβαίνει το κόστος των δύο φορτιστών που τελικά δεν θα εγκατασταθούν.

Συγκεκριμένα:

Πίνακας 8: Αποτελέσματα σεναρίου 3

Τιμή Παραμέτρου	Στάσεις Εγκατάστασης Φορτιστή Ισχύος 150 kW	Σύνολο
BC = 60 kWh	0, 15, 27, 28, 29, 3, 4	9
BC = 80 kWh	—	0

Τα αποτελέσματα του σεναρίου 3 αναπαρίστανται και διαγραμματικά:



Σχήμα 41: Διαγραμματική αναπαράσταση Σεναρίου 3

6.1.4: Μεταβολή του Ποσοστού SOC_{max} και της Χωρητικότητας Μπαταρίας BC

Μεταβάλλοντας το ποσοστό SOC_{max} από 80 σε 70% με την χωρητικότητα της μπαταρίας στις 70 kWh αυξάνονται κατά 9 οι φορτιστές ισχύος 150 kW που θα εγκατασταθούν σε ενδιάμεσες στάσεις του δικτύου. Για $SOC_{max} = 60\%$ και χωρητικότητα μπαταρίας ίση με 70 kWh δεν απαιτείται κάποιος φορτιστής ισχύος 150 kW στις ενδιάμεσες στάσεις αλλά, χρειάζεται η εγκατάσταση δύο επιπλέον φορτιστών ισχύος 450 kW στις τερματικές στάσεις 2 και 20. Για $SOC_{max} = 70\%$ και χωρητικότητα μπαταρίας ίση με 80 kWh απαιτείται η εγκατάσταση 2 επιπλέον φορτιστών σε ενδιάμεσες στάσεις. Στην περίπτωση όπου για $SOC_{max} = 70\%$ αυξηθεί η χωρητικότητα της μπαταρίας στις 90 kWh δεν απαιτείται η εγκατάσταση φορτιστών ισχύος 150 kW στις ενδιάμεσες στάσεις. Το ίδιο συμβαίνει και όταν $BC = 100 kWh$. Για αυτή την χωρητικότητα μπαταρίας, όμως, και για $SOC_{max} = 60\%$ απαιτούνται δύο επιπλέον φορτιστές ενώ, για $SOC_{max} = 50\%$ απαιτούνται 20 επιπλέον φορτιστές στις ενδιάμεσες στάσεις και ένας λιγότερος στην τερματική στάση 2.

Από τα αποτελέσματα αυτά γίνεται αντιληπτό ότι για το δεδομένο δίκτυο λεωφορειακών γραμμών δεν έχουν ιδιαίτερο νόημα οι παρακάτω μεταβολές των παραμέτρων SOC_{max} σε συνδυασμό με την μεταβολή της BC – εκτός από μία περίπτωση. Στις πρώτες δύο περιπτώσεις για αμετάβλητη BC και σταδιακή μείωση ανά 10% του SOC_{max} έως το 60%, σημειώνεται επιβάρυνση με επιπλέον φορτιστές. Στις επόμενες τρεις περιπτώσεις για $SOC_{max} = 70\%$ και σταδιακή αύξηση της BC ανά 10 kWh έως τις 100 kWh είτε χρειάζονται δύο επιπλέον φορτιστές ισχύος 150 kW είτε, δεν χρειάζεται κανένας φορτιστής στις ενδιάμεσες στάσεις. Να σημειωθεί, σε αυτό το σημείο, ότι η περίπτωση με $BC = 90 kWh$ ίσως έχει θετικό αντίκτυπο στο δίκτυο αυτό – μειώνονται κατά 2 οι φορτιστές στις ενδιάμεσες στάσεις – μόνο εάν η αύξηση του κόστους για την αγορά μπαταριών 90 kWh δεν υπερβαίνει το κόστος για την εγκατάσταση 2 φορτιστών ισχύος 150 kW με χωρητικότητα μπαταρίας στις 70 kWh, που αποτελεί και την βασική τιμή. Αναλυτικότερα, σύμφωνα με τον *Wolański M. (2013)* για μία τιμή των μπαταριών των ηλεκτρικών λεωφορείων ανά kWh ίση με 1000 € / kWh, μία αύξηση κατά 20000 € στην τιμή της μπαταρίας (από τις 70 στις 90 kWh), ενδέχεται να είναι μικρότερη από το κόστος των δύο φορτιστών 150 kW, οπότε το σενάριο αυτό μπορεί να υιοθετηθεί. Οι τελευταίες δύο περιπτώσεις – ιδίως η τελευταία –, επιβαρύνουν το δίκτυο με περισσότερους φορτιστές ενώ, ταυτόχρονα, αυξάνεται και το κόστος για την μπαταρία μεγαλύτερης χωρητικότητας, οπότε δεν έχουν νόημα εφαρμογής.

Συγκεκριμένα:

Πίνακας 9: Αποτελέσματα σεναρίου 4

Τιμή Παραμέτρου	Στάσεις Εγκατάστασης Φορτιστή Ισχύος 150 kW	Μεταβολή Αριθμού Φορτιστών Ισχύος 450 kW στο Τέρμα	Σύνολο ($X_i + Y_i$)
$SOC_{max} = 70\%$ & $BC = 70 kWh$	0, 15, 17, 21, 24, 25, 28, 29, 4, 7, 6	–	11 + 12
$SOC_{max} = 60\%$ & $BC = 70 kWh$	–	+ 2: ένας επιπλέον στις στάσεις 20 και 21	0 + 14
$SOC_{max} = 70\%$ & $BC = 80 kWh$	15, 29, 4, 7	–	4 + 12
$SOC_{max} = 70\%$ & $BC = 90 kWh$	–	–	0 + 12

SOC _{max} = 70% & BC = 100 kWh	–	–	0 + 12
SOC _{max} = 60% & BC = 100 kWh	15, 28, 29, 4	–	4 + 12
SOC _{max} = 50% & BC = 100 kWh	0, 10, 12, 15, 16, 17, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 3, 4, 6, 7, 8, 9	–1: ένας λιγότερος στην στάση 2	22 + 11

6.1.5: Μεταβολή του Ποσοστού SOC_{max} και της Ισχύος P_s των Φορτιστών στις Ενδιάμεσες Στάσεις

Μειώνοντας το ποσοστό του SOC_{max} στο 70% και αυξάνοντας την ισχύ φόρτισης στις ενδιάμεσες στάσεις από 150 σε 200 kW απαιτούνται επιπλέον 6 φορτιστές, από 150 σε 250 kW απαιτούνται επιπλέον 4 ενώ, από 150 σε 250 kW απαιτούνται επιπλέον 3. Ο αριθμός των φορτιστών ισχύος 450 kW στις τερματικές στάσεις δεν μεταβάλλεται – παραμένει ίσος με 12.

Από τα αποτελέσματα αυτά, γίνεται αντιληπτό ότι η ταυτόχρονη μείωση του ποσοστού του SOC_{max} στο 70% με την αύξηση της ισχύος των φορτιστών στις ενδιάμεσες στάσεις, δεν συμβάλλει θετικά στο δίκτυο, καθώς οι φορτιστές που απαιτούνται είναι σημαντικά περισσότεροι. Επομένως, είναι προτιμότερο η ισχύς να διατηρηθεί στα 150 kW και το SOC_{max} στο 80%. Αυτό, γιατί ακόμα και με την αύξηση της ισχύος για SOC_{max} = 80%, χρειάζονται περισσότεροι φορτιστές.

Συγκεκριμένα:

Πίνακας 10: Αποτελέσματα σεναρίου 5.1

Τιμή Παραμέτρου	Στάσεις Εγκατάστασης Φορτιστή Ισχύος 150 kW	Σύνολο
SOC _{max} = 80% & P _s = 150 kW	15, 27	2
SOC _{max} = 70% & P _s = 150 kW	0, 15, 17, 21, 24, 25, 28, 29, 4, 7, 6	11
SOC _{max} = 80% & P _s = 200 kW	7, 28	2
SOC _{max} = 70% & P _s = 200 kW	0, 1, 15, 25, 29, 4, 6, 7	8
SOC _{max} = 80% & P _s = 250 kW	29	1
SOC _{max} = 70% & P _s = 250 kW	0, 15, 25, 4, 6	6
SOC _{max} = 80% & P _s = 350 kW	15	1
SOC _{max} = 70% & P _s = 350 kW	22, 26, 29, 4, 6	5

Στην περίπτωση όπου το ποσοστό του SOC_{max} μειωθεί στο 60% με την χωρητικότητα της μπαταρίας να παραμένει στις 70 kWh και η ισχύ φόρτισης να μεταβάλλεται όπως και παραπάνω, προκύπτουν τα εξής:

Πίνακας 11: Αποτελέσματα σεναρίου 5.2

Τιμή Παραμέτρου	Στάσεις Εγκατάστασης Φορτιστή Ισχύος 150 kW	Μεταβολή Αριθμού Φορτιστών Ισχύος 450 kW στο Τέρμα	Σύνολο ($X_i + Y_i$)
$SOC_{max} = 80\%$ & $P_s = 150$ kW	15, 27	–	2 + 12
$SOC_{max} = 60\%$ & $P_s = 150$ kW	–	+ 2: ένας επιπλέον στις στάσεις 2 και 20	11 + 14
$SOC_{max} = 80\%$ & $P_s = 200$ kW	7, 28	–	2 + 12
$SOC_{max} = 60\%$ & $P_s = 200$ kW	0, 10, 13, 15, 17, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 3, 4, 6, 7	–2: ένας λιγότερος στις στάσεις 2 και 23	18 + 10
$SOC_{max} = 80\%$ & $P_s = 250$ kW	29	–	1 + 12
$SOC_{max} = 60\%$ & $P_s = 250$ kW	0, 10, 15, 17, 21, 22, 24, 25, 26, 29, 6, 7, 8	–2: ένας λιγότερος στις στάσεις 2 και 23	14 + 10
$SOC_{max} = 80\%$ & $P_s = 350$ kW	15	–	1 + 12
$SOC_{max} = 60\%$ & $P_s = 350$ kW	0, 12, 15, 20, 22, 29, 3, 4, 5, 6	–2: ένας λιγότερος στις στάσεις 2 και 23	10 + 10

Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν, ότι είναι προτιμότερο το ποσοστό του SOC_{max} να παραμείνει στο 80% και η ισχύς στα 150 kW, καθώς η αμέσως επόμενη τιμή ισχύος για την οποία μειώνονται οι φορτιστές – η τιμή των 250 kW – προσφέρει απλά την δυνατότητα μείωσης κατά έναν φορτιστή στις ενδιάμεσες στάσεις.

6.1.6: Μεταβολή της Ισχύος P_f των Φορτιστών στις Τερματικές Στάσεις

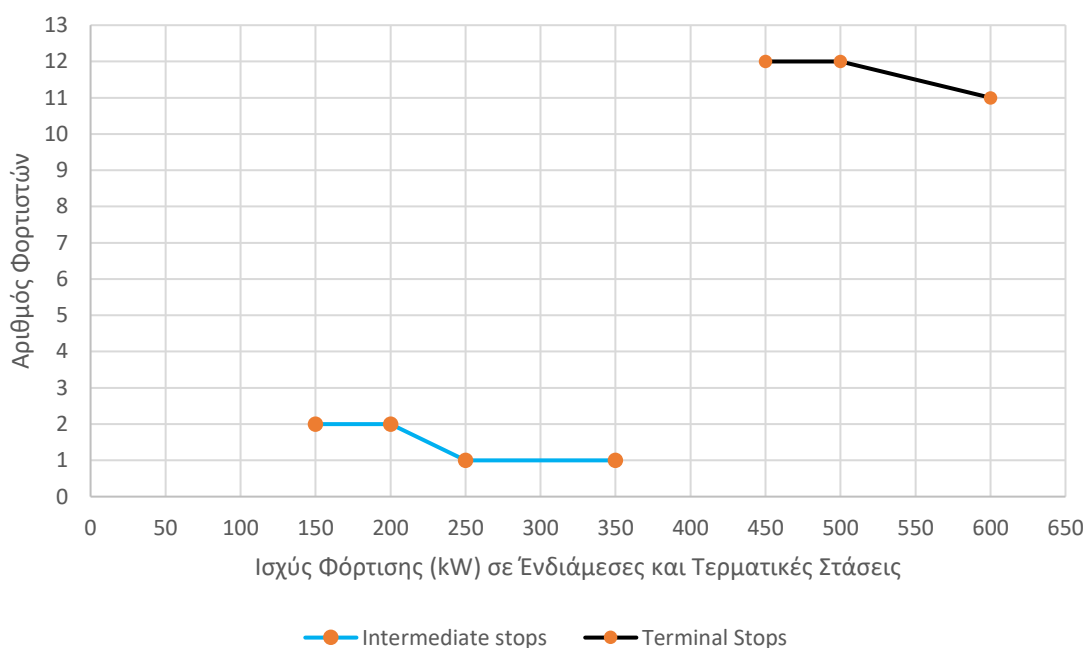
Διατηρώντας την χωρητικότητα της μπαταρίας ίση με 70 kWh αλλά και το ελάχιστο και μέγιστο επιτρεπόμενο επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας ίσο με 20 και 80%, αντίστοιχα, και αυξάνοντας την ισχύ φόρτισης στις τερματικές στάσεις, αναμένεται και μία μείωση των απαιτούμενων φορτιστών στο δίκτυο. Πράγματι, προκύπτει ότι με ισχύ φόρτισης στα 500 kW απαιτείται ένας μόνο φορτιστής στις ενδιάμεσες στάσεις ενώ, στις τερματικές δεν μεταβάλλεται ο αριθμός αυτών – παραμένει ίσος με 12. Για ισχύ φόρτισης ίση με 600 kW (για ισχύ ίση 550 kW δεν υπήρξε κάποια διαφορά με τα αποτελέσματα των 500 kW) χρειάζεται, όπως και πριν, ένας μόνο φορτιστής στις ενδιάμεσες στάσεις αλλά και ένας λιγότερος στις τερματικές.

Συγκεκριμένα:

Πίνακας 12: Αποτελέσματα σεναρίου 6

Τιμή Παραμέτρου	Στάσεις Εγκατάστασης Φορτιστή Ισχύος 150 kW	Μεταβολή Αριθμού Φορτιστών Ισχύος 450 kW στο Τέρμα	Σύνολο ($X_i + Y_i$)
$P_f = 500$ kW	29	–	1 + 12
$P_f = 600$ kW	29	–1: ένας λιγότερος στην στάση 2	1 + 11

Τα αποτελέσματα του σεναρίου 6 και του 5.1 για $SOC_{max} = 80\%$ παρουσιάζονται και διαγραμματικά:



Σχήμα 42: Διαγραμματική παρουσίαση σεναρίων 5.1 και 6

6.1.7: Μεταβολή της Ισχύος Φόρτισης P_f στις Τερματικές Στάσεις, της Χωρητικότητας της μπαταρίας BC, του Ποσοστού SOC_{max} και του εύρους τιμών της Ακέραιας Μεταβλητής Απόφασης Y_i

Η εξέταση της συγκεκριμένης περίπτωσης γίνεται, στην ουσία, για να αναδειχθεί η ορθότητα του κώδικα που έχει αναπτυχθεί αλλά, και η σύνδεση μεταξύ των δύο προβλημάτων τα οποία ενώνει. Οι τιμές που λαμβάνουν οι παράμετροι είναι πιο αυστηρές, οπότε και αναμένονται ανάλογα αποτελέσματα για τον αριθμό των φορτιστών που πρόκειται να εγκατασταθούν.

Συγκεκριμένα:

Πίνακας 13: Αποτελέσματα σεναρίου 7

Τιμή Παραμέτρου	Στάσεις Εγκατάστασης Φορτιστή Ισχύος 150 kW	Μεταβολή Αριθμού Φορτιστών στο Τέρμα	Σύνολο ($X_i + Y_i$)
BC = 70 kWh, $SOC_{min} = 30\%$, $P_f = 150$ kW & $Y_i = \{0,8\}$	0, 10, 15, 24, 26, 28, 29, 4, 6, 7	+ 14 επιπλέον φορτιστές ισχύος 150 kW	10 + 28
BC = 70 kWh, $SOC_{min} = 30\%$, $P_f = 250$ kW & $Y_i = \{0,8\}$	0, 10, 15, 22, 24, 26, 28, 29, 4, 6, 7	+ 8 επιπλέον φορτιστές ισχύος 250 kW	11 + 20

BC = 60 kWh, SOC _{min} = 30%, P _f = 150 kW & Y _i = {0,8}	0, 10, 12, 13, 15, 16, 17, 2, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 3, 4, 6, 7	+11 επιπλέον φορτιστές ισχύος 150 kW	22 + 25
BC = 60 kWh, SOC _{min} = 30%, P _f = 250 kW & Y _i = {0,8}	0, 10, 12, 13, 15, 16, 17, 2, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 3, 4, 6, 7	+ 10 επιπλέον φορτιστές ισχύος 250 kW	20 + 22

Όπως φαίνεται, λοιπόν, και από τα παραπάνω αποτελέσματα στην περίπτωση όπου η χωρητικότητα της μπαταρίας να είναι 60 kWh και η ισχύς φόρτισης στις τερματικές στάσεις μειωθεί σημαντικά – από τις 450 kW στις 250 kW και στις 150 kW – απαιτείται σημαντικά υψηλότερος αριθμός φορτιστών στις ενδιάμεσες στάσεις αλλά και στις τερματικές. Επίσης, στις περιπτώσεις όπου η ισχύς φόρτισης στις τερματικές είναι ίση με 150 kW, για χωρητικότητα μπαταρίας ίση με 60 και 70 kWh, ο χρόνος φόρτισης στις τερματικές είναι μεγαλύτερος από το ανώτερο όριο των 8 λεπτών που έχει οριστεί ως το ανώτερο όριο του χρόνου αναμονής σε αυτές. Οπότε, μία τέτοια προσέγγιση δεν είναι εφικτή και λόγω αυτού αλλά, και λόγω του υψηλότερου κόστους που προκύπτει αναλογικά με τον αριθμό των προς εγκατάσταση φορτιστών.

6.1.8: Μεταβολή της Συχνότητας $f_{i,R}$ με την οποία φτάνουν τα Ηλεκτρικά Λεωφορεία στο Τέρμα της κάθε Γραμμής

Στην συγκεκριμένη περίπτωση θα εξεταστεί η μεταβολή του αριθμού των φορτιστών που απαιτούνται τόσο στις ενδιάμεσες όσο και στις τερματικές στάσεις, εάν αυξηθεί ο αριθμός των ηλεκτρικών λεωφορείων που φτάνουν στο τέρμα της κάθε μίας γραμμής. Οι νέες αυξημένες συχνότητες παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 14: Οι νέες συχνότητες των ηλεκτρικών λεωφορείων ανά γραμμή

Γραμμή - Τερματικός	Αρχική Συχνότητα (οχήματα / h)	Νέα Αυξημένη Συχνότητα (οχήματα / h)
Γραμμή 0 – Τερματικός 1	11	25
Γραμμή 1 – Τερματικός 3	9	28
Γραμμή 2 – Τερματικός 21	10	27
Γραμμή 3 – Τερματικός 2	6	26
Γραμμή 4 – Τερματικός 1	7	20
Γραμμή 5 – Τερματικός 19	8	18
Γραμμή 6 – Τερματικός 0	8	28
Γραμμή 7 – Τερματικός 2	9	16
Γραμμή 8 – Τερματικός 23	10	25
Γραμμή 9 – Τερματικός 4	5	22
Γραμμή 10 – Τερματικός 20	11	27
Γραμμή 11 – Τερματικός 23	6	19

Με βάση αυτές τις νέες συχνότητες, λοιπόν, αναμένεται μία αύξηση στους φορτιστές που απαιτούνται να εγκατασταθούν στο δίκτυο. Έχοντας ορίσει την ακέραια μεταβλητή απόφασης Y_i να λαμβάνει τιμές εντός του εύρους $\{0, 3\}$, δεν προκύπτει κάποια βέλτιστη λύση. Για αυτό το λόγο αυξάνεται το εύρος της μεταβλητής στο αμέσως επόμενο κατάλληλο ώστε, να προκύψει βέλτιστη λύση, δηλαδή στο $\{0, 5\}$. Προκύπτει, επομένως, ότι απαιτούνται συνολικά 28 φορτιστές ισχύος 450 kW στις τερματικές στάσεις και 2 φορτιστές ισχύος 150 kW στις ίδιες ενδιάμεσες στάσεις του δικτύου (15, 27).

Συγκεκριμένα:

Πίνακας 15: Αποτελέσματα σεναρίου 8

Τερματική Στάση	Φορτιστές Ισχύος 450 kW / Τέρμα βάσει Αρχικής Συχνότητας	Φορτιστές Ισχύος 450 kW / Τέρμα βάσει Νέας Αυξημένης Συχνότητας
0	1	3
1 (γραμμή 0 και 4)	2	5
19	1	2
2 (γραμμή 7 και 21)	2	4
20	1	3
21	1	2
23 (γραμμή 8 και 11)	2	4
3	1	3
4	1	2
Σύνολο	12	28

6.1.9: Μεταβολή της Συχνότητας $f_{i,R}$ με την οποία φτάνουν τα ηλεκτρικά λεωφορεία στο τέρμα της κάθε γραμμής και της Ισχύς Φόρτισης P_f στις Τερματικές Στάσεις

Βάσει των νέων αυξημένων συχνοτήτων προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των φορτιστών που απαιτούνται στις τερματικές στάσεις, θα αυξηθεί η ισχύς των φορτιστών σε αυτές από 450 kW σε 550 kW. Προκύπτει, ότι απαιτούνται 5 λιγότεροι φορτιστές. Συγκεκριμένα:

Πίνακας 16: Αποτελέσματα σεναρίου 9

Τερματική Στάση	Φορτιστές Ισχύος 450 kW / Τέρμα βάσει Νέας Αυξημένης Συχνότητας	Φορτιστές Ισχύος 550 kW / Τέρμα βάσει Νέας Αυξημένης Συχνότητας
0	3	2
1 (γραμμή 0 και 4)	5	4
19	2	2
2 (γραμμή 7 και 21)	4	3
20	3	2
21	2	2
23 (γραμμή 8 και 11)	4	4
3	3	2
4	2	2
Σύνολο	28	23

Να σημειωθεί, ότι και στις 2 προαναφερθείσες περιπτώσεις – με τις νέες συχνότητες και την ισχύ στα 450 kW και στα 550 kW – ο χρόνος φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων διατηρείται κάτω του ανώτερου επιτρεπόμενου ορίου των 8 λεπτών που έχει οριστεί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Επίλογος

7.1: Το Συμπέρασμα

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξέτασε το πρόβλημα της χωροθέτησης εγκαταστάσεων (facility location problem) από την πλευρά της εγκατάστασης φορτιστών για την φόρτιση των ηλεκτρικών λεωφορείων σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο λεωφορειακών γραμμών – την ηλεκτροδότηση του δικτύου – , ώστε να διασφαλίζεται η σωστή λειτουργία των λεωφορείων και η έγκαιρη έναρξη και περάτωση των δρομολογίων. Πρόκειται για μία έρευνα, η οποία στοχεύει στην μετάβαση σε ένα δίκτυο μεταφορών πιο φιλικό προς το περιβάλλον αλλά και τον χρήστη, αποδοτικότερο και λειτουργικά οικονομικότερο σε σύγκριση με ένα τυπικό δίκτυο μεταφορών με λεωφορεία ντίζελ.

Βάσει όλης της παραπάνω ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε, έγινε αντιληπτή τόσο η ευαισθησία του αλγορίθμου στις αλλαγές των παραμέτρων – πόσο μεταβάλλεται η λύση – όσο και ποια περίπτωση από όλες τις προαναφερθείσες μπορεί να υιοθετηθεί ως η αμέσως επόμενη βέλτιστη λύση στο πρόβλημα της χωροθέτησης των φορτιστών. Συγκεκριμένα, η περίπτωση όπου το ελάχιστο επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας SOC_{min} διατηρηθεί ίσο με 20%, το μέγιστο επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας SOC_{max} ίσο με 80%, και όλες οι υπόλοιπες παράμετροι ίσες με τις αρχικές βασικές τιμές τους αλλά, η χωρητικότητα της μπαταρίας αυξηθεί κατά 10 kWh, δηλαδή $BC = 80$ kWh, δίνει την δυνατότητα να μην εγκατασταθεί κανένας φορτιστής ισχύος $P_s = 150$ kW στις ενδιάμεσες στάσεις. Βέβαια, αυξάνεται κατά ένα πολύ μικρό ποσοστό ο χρόνος φόρτισης στην τερματική στάση 1, στην οποία καταλήγουν ηλεκτρικά λεωφορεία από τις διαδρομές 0 και 4, γεγονός το οποίο μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την λειτουργία του δικτύου, με την καθυστέρηση παραδείγματος χάριν της έναρξης των δρομολογίων των γραμμών αυτών. Η μείωση στον αριθμό των απαιτούμενων φορτιστών οδηγεί κατ' επέκταση στην εξοικονόμηση χρημάτων από την εγκατάσταση των δύο φορτιστών ισχύος 150 kW με το βασικό σενάριο. Αυτό το γεγονός δείχνει, ότι με σχετικά μικρές αυξήσεις στην επένδυση που απαιτείται για την ηλεκτροδότηση του δικτύου, τα λειτουργικά οφέλη που μπορεί αυτή να αποφέρει είναι ιδιαίτερα σημαντικά. Πράγματι, η ευκαιριακή χρέωση μπορεί να οδηγήσει σε επιπλέον καθυστερήσεις για τους επιβάτες του ηλεκτρικού λεωφορείου και να επιδεινώσει τα φαινόμενα συσσώρευσης λεωφορείων στις στάσεις. Γενικά, όμως, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η εξέταση των χρόνων αναμονής καθορίζουν ουσιαστικά τον αριθμό των φορτιστών που μπορούν να εγκατασταθούν στις τερματικές στάσεις του δικτύου .

7.2: Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος της χωροθέτησης φορτιστών στο δίκτυο λεωφορειακών διαδρομών Mumford0, αναπτύχθηκαν δύο αντικειμενικές συναρτήσεις, οι οποίες στόχευαν στην ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης για την εγκατάσταση αυτών. Η προσέγγιση αυτή δεν είναι η μοναδική που μπορεί να υιοθετηθεί για την επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος. Είναι δυνατόν να ληφθούν υπόψιν και άλλες παράμετροι – μεταβλητές, αλλά και δεδομένα, που με τον δικό τους τρόπο θα επηρεάζουν

το πως θα χωροθετηθούν βέλτιστα οι φορτιστές για την εξυπηρέτηση ενός δικτύου ηλεκτρικών λεωφορείων.

Μία πρώτη διαφορετική προσέγγιση είναι να ληφθεί υπόψιν κάποιος περιορισμός – ανώτατο όριο – όσον αφορά το κόστος της συγκεκριμένης επένδυσης, ώστε μόλις αυτό ξεπεραστεί, ο αλγόριθμος να απορρίπτει την συγκεκριμένη λύση και να πραγματοποιούνται, ενδεχομένως, εγκατάσταση λιγότερων φορτιστών.

Επίσης, μπορεί να εισαχθεί στο παρών πρόβλημα και το κόστος αγοράς των ηλεκτρικών λεωφορείων, ώστε ανάλογα με την ζήτηση της κάθε γραμμής – στάσης, να περιορίζεται ο αριθμός των ηλεκτρικών λεωφορείων που θα την εξυπηρετούν και κατά επέκταση ο αριθμός των προς εγκατάσταση φορτιστών.

Αναφορικά με τον χρόνο αναμονής στις τερματικές στάσεις του δικτύου, με την παροχή δεδομένων όπως το πότε ξεκινάει το κάθε λεωφορείο μίας συγκεκριμένης γραμμής από την αφετηρία, πόση ώρα χρειάζεται προκειμένου να καταλήξει στην τερματική στάση, αν και πόσα λεωφορεία καταλήγουν στην ίδια τερματική στάση και τέλος, πόση ώρα χρειάζονται στη φόρτιση μέχρι ένα συγκεκριμένο ποσοστό, είναι δυνατόν να γίνει σε πραγματικό χρόνο μία προσομοίωση, και να προκύψουν αποτελέσματα αναφορικά με τις ουρές αναμονής που δημιουργούνται σε κάθε τερματική στάση στην οποία έχει εγκατασταθεί φορτιστής, με το χρόνο που θα περιμένει το κάθε λεωφορείο στην ουρά μέχρι να εξυπηρετηθεί συμπεριλαμβανομένου και του χρόνου φόρτισης που απαιτείται, και τελικά, αν αυτός ο συνολικός χρόνος δεν υπερβαίνει ένα ανώτερο επιτρεπόμενο όριο που θα έχει οριστεί. Με την ικανοποίηση αυτού του τελευταίου περιορισμού το δίκτυο θα λειτουργεί χωρίς καθυστερήσεις στην έναρξη των δρομολογίων, κάτι που θα είναι και ευχάριστο για τους μετακινούμενους.

Στην προαναφερθείσα προσέγγιση μπορεί να προστεθεί και ο παράγοντας της ζήτησης που χαρακτηρίζει το εκάστοτε δίκτυο, ώστε να διαμορφώνεται κατάλληλα για κάθε τερματική στάση το ανώτερο όριο του χρόνου αναμονής. Σε τερματικές στάσεις με χαμηλή ζήτηση, δηλαδή, ενδεχομένως το όριο αυτό μπορεί να είναι και μικρότερο, σε σύγκριση με τερματικές στις οποίες η ζήτηση είναι υψηλότερη. Τέλος, μπορεί να κοστολογηθεί ο χρόνος αναμονής στις τερματικές στάσεις ώστε, να εισαχθεί ως όρος στην αντικειμενική συνάρτηση, η οποία θα τον ελαχιστοποιεί σε συνδυασμό με το ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης στους φορτιστές.

Βιβλιογραφία

1. Christina Iliopoulou, Ioannis Tassopoulos, Konstantinos Kepaptsoglou, and Grigorios Beligiannis. « Electric Transit Route Network Design Problem: Model and Application », Transportation Research Record 2019, Vol. 2673 (8) 264 – 274.
2. Yi He, Ziqi Song, Zhaocai Liu. « Fast – charging station deployment for battery electric bus systems considering electricity demand charges », Sustainable Cities and Society 48 (2019) 101530.
3. Tugce Uslu, Onur Kaya. « Location and capacity decisions for electric bus charging stations considering waiting times », Transportation Research Part D 90 (2021) 102645.
4. Xiaomei Wu, Qijin Feng, Chenchen Bai, Chun Sing Lai, Youwei Jia, Loi Lei Lai. « A novel fast-charging stations locational planning model for electric bus transit system », Energy 224 (2021) 120106.
5. Zhiming Gao a, Zhenhong Lin, Tim J. LaClair, Changzheng Liu, Jan-Mou Li, Alicia K. Birky, Jacob Ward. « Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service », Energy 122 (2017) 588e600.
6. Kun An. « Battery electric bus infrastructure planning under demand uncertainty », Transportation Research Part C 111 (2020) 572–587.
7. Chao Zhang, Yi-Li Wei, Peng-Fei Cao, Meng-Chang Lin. « Energy storage system: Current studies on batteries and power condition system », Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018) 3091–3106.
8. Huajie Ding, Zechun Hu, Yonghua Song. « Value of the energy storage system in an electric bus fast charging station », Applied Energy 157 (2015) 630–639.
9. Moataz Mahmouda, Ryan Garnett, Mark Ferguson, Pavlos Kanaroglou. « Electric buses: A review of alternative powertrains », Renewable and Sustainable Energy Reviews 62 (2016) 673–684.
10. Alexander Kunitz, Roman Mendeleevitch & Dietmar Goehlich. « Electrification of a city bus network—An optimization model for cost-effective placing of charging infrastructure and battery sizing of fast – charging electric bus systems, INTERNATIONAL JOURNAL OF SUSTAINABLE TRANSPORTATION 2017, VOL. 11, NO. 10, 707–720.
11. Nan Qin a, Azwirman Gusrialdi, R. Paul Brooker, Ali T-Raissi. « Numerical analysis of electric bus fast charging strategies for demand charge reduction », Transportation Research Part A 94 (2016) 386–396.
12. Haisheng Chen, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li, Yulong Ding. « Progress in electrical energy storage system: A critical review », Progress in Natural Science 19 (2009) 291–312.

13. Moataz Mohameda, Hany Farag, Nader El-Taweel, Mark Ferguson. « Simulation of electric buses on a full transit network: Operational feasibility and grid impact analysis », *Electric Power Systems Research* 142 (2017) 163–175.
14. Ayman Abdelwahed, Pieter L. van den Berg, Tobias Brandt, John Collins, Wolfgang Ketter. « Evaluating and Optimizing Opportunity Fast – Charging Schedules in Transit Battery Electric Bus Networks », *TRANSPORTATION SCIENCE* Vol. 54, No. 6, November–December 2020, pp. 1601–1615.
15. Antti Lajunen, Timothy Lipmana. « Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses », *Energy* Volume 106, 1 July 2016, Pages 329-342.
16. C Iclodean, B Varga, N Burnete, D Cimerdean and B Jurchiş. « Comparison of Different Battery Types for Electric Vehicles », *CAR* – 2017.
17. Piotr Julian Biczal and Maciej Kwiatkowski. « Batteries in a vehicle – conditions, capabilities and limitations », *MATEC Web of Conferences* 180, 03001 (2018).
18. Reza Zanjirani Farahani, Nasrin Asgari, Nooshin Heidari, Mahtab Hosseininia, Mark Goh. « Covering problems in facility location: A review », *Computers & Industrial Engineering* Volume 62, Issue 1, February 2012, Pages 368-407.
19. Georgina Santos. « Road transport and CO2 emissions: What are the challenges? », *Transport Policy* Volume 59, October 2017, Pages 71-74.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο παρών παράρτημα παρουσιάζεται ο κώδικας που αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Python 3, στο προγραμματιστικό περιβάλλον Spyder 3.8:

```
from __future__ import division

import pulp as pl

import numpy as np

import sys

np.random.seed(9)

# READ DATA AND CREATE DICTIONARIES

# -- Urban Transit Network Used: Mumford0 --

TravelTimes = np.loadtxt("Mumford0TravelTimes.txt")

Frequency = { 0: {1 : 11},
              1: {3: 9},
              2: {21: 10},
              3: {2: 6},
              4: {1: 7},
              5: {19: 8},
              6: {0: 8},
              7: {2: 9},
              8: {23: 10},
              9: {4: 5},
              10: {20: 11},
              11: {23: 6}
            }

'''
```

```
Frequency = { 0: {1 : 25},
              1: {3: 28},
              2: {21: 27},
              3: {2: 26},
              4: {1: 20},
              5: {19: 18},
              6: {0: 28},
              7: {2: 16},
              8: {23: 25},
              9: {4: 22},
              10: {20: 27},
              11: {23: 19}
            }
```

'''

Routes = το δίκτυο που συμπεριλαμβάνει όλες τις γραμμές και τους σταθμούς

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

```

# RoutesNumber = ο αριθμός των λεωφορειακών γραμμών στο δίκτυο
RoutesNumber = len(RoutesNetwork)

# Routes = Λίστα με το id της κάθε διαδρομής
Routes = [R for R in range(RoutesNumber)]
MergedRoutes = []
for Element in RoutesNetwork:
    MergedRoutes += Element
UniqueNodes = set(MergedRoutes)

Start = [route[0] for route in RoutesNetwork]
End = [route[-1] for route in RoutesNetwork]
StartEnd = set(Start + End)
EndSet = set(End)

avBusSpeed = 15 # km/h
BC = 70 # kWh
SOCmin = 0.20 # 20%
SOCmax = 0.80 # 80%
SOCin = 0.80 # η αρχική στάθμη της μπαταρίας συμπίπτει στην αφετηρία της γραμμής με τη
μέγιστη επιτρεπόμενη
AverageEnergyConsumption = 2.5 # kWh/km

CouplingTime = 5 # sec.
# DecouplingTime (dte) = ο χρόνος αποσύνδεσης του φορτιστή από το ηλεκτρικό λεωφορείο
DecouplingTime = 5 # sec.
# ChargerCostX (Cs_^fc) = το κόστος εγκατάστασης φορτιστή τύπου X για ενδιάμεσες στάσεις
ChargerCostX = 80000 # €
# ChargerCostY (Cf_^fc) = το κόστος εγκατάστασης φορτιστή τύπου Y για τερματικούς
σταθμούς
ChargerCostY = 150000 # €
# ChargerPowerX = η ισχύς του φορτιστή (kW) τύπου X για ενδιάμεσες στάσεις

```



```

ChargerPowerX = 150 # kW
# ChargerPowerY = η ισχύς του φορτιστή (kW) τύπου Y για τις τερματικές στάσεις
ChargerPowerY = 450 # kW
# ChargerEfficiencyX (CXef) = η αποδοτικότητα του φορτιστή (%) τύπου X για ενδιάμεσες
στάσεις
ChargerEfficiencyX = 0.90 # 90%
# ChargerEfficiencyY (CYef) = η αποδοτικότητα του φορτιστή (%) τύπου Y για τερματικούς
στάσεις
ChargerEfficiencyY = 0.90 # 90%
# MaxDwellTime (dtiR) = ο μέγιστος χρόνος παραμονής στην στάση i της διαδρομής R
MaxDwellTime = 40 # in seconds
t = 8 # minutes

# Αρχικοποίηση των dictionaries για να γεμίσουν με τις τιμές από τα αρχεία δεδομένων
TravelTimeDict = {} # in minutes
G = {} # grade

for Node in range(len(TravelTimes)):
    TravelTimeDict[Node] = {}
    G[Node] = {}
    for next in range(len(TravelTimes)):
        if next != Node:
            if TravelTimes[Node, next] != 0 and TravelTimes[Node, next] != float("inf"):
                TravelTimeDict[Node][next] = TravelTimes[Node, next]
                G[Node][next] = 0 # np.random.randint(6)# gg[node,next] # 0-5

# Grade has random grades from 0-5
# GECfactor: % increase in average Energy Consumption for standard grades
GECfactor = {0: 0, 1: 2, 2: 5, 3: 13, 4: 18, 5: 26} # %
# for 1% grade increase in EC by 2%, for 2% grade 5% increase etc. VALUES BASED ON PAPER

```

```
EnergyConsumptionDict = {} # Dictionary με την κατανάλωση ενέργειας για την διάνυση του τμήματος i-j
```

```
DwellTimeDict = {} # Dictionary με τον χρόνο παραμονής σε κάθε στάση i
```

```
TransferStops = {} # Σταθμοί μετεπιβίβασης
```

```
for idr, route in enumerate(RoutesNetwork):
```

```
    TransferStops[idr] = {}
```

```
    for id2, route2 in enumerate(RoutesNetwork):
```

```
        if route2 != route:
```

```
            x = list(set(route).intersection(route2))
```

```
            # print x, has the common nodes between routes
```

```
            TransferStops[idr][id2] = x
```

```
EnergyConsumptionDict[idr] = {} #kWh
```

```
DwellTimeDict[idr] = {}
```

```
# E[routeset.index(route)]={}
```

```
for node in route:
```

```
    # E[routeset.index(route)][node]= np.nan
```

```
    DwellTimeDict[idr][node] = 20 # in seconds
```

```
for sublist in TransferStops[idr].values():
```

```
    my_set = set(sublist)
```

```
    if node in my_set:
```

```
        DwellTimeDict[idr][node] = 40 #in seconds
```

```
if node != route[-1]:
```

```
    EnergyConsumptionDict[idr][node] = {}
```

```
    EnergyConsumptionDict[idr][node][route[route.index(node) + 1]] = (
```

```
        AverageEnergyConsumption
```

```
        * (1 + 0.01 * GECfactor[G[node][route[route.index(node) + 1]]])
```

```
        * (TravelTimeDict[node][route[route.index(node) + 1]] / 60)
```

```
        * avBusSpeed ) # Υπολογισμός της μέσης κατανάλωσης ανά διαδρομή
```

```

AllMiddleStops = list()
for route in RoutesNetwork:
    AllMiddleStops += route[1:-1]
AllMiddleStops = set(AllMiddleStops)

StartEndOnly = list()
for node in StartEnd:
    if node not in AllMiddleStops:
        StartEndOnly += node
StartEndOnly = set(StartEndOnly)

# DECISION VARIABLES
'''
Μεταβλητή Απόφασης 1 - περιορισμός 6
'''
# Xi: λαμβάνει τιμή 0/1 εάν χωροθετηθεί ή όχι φορτιστής στην ενδιάμεση στάση i
X = pl.LpVariable.dicts("X_%s", (TravelTimeDict), cat="Binary", lowBound=0, upBound=1)

# tcharg iR : charging time at stop i on route R (sec.) [Routes,Nodes must be lists]
Tcharg = pl.LpVariable.dicts(
    "Tcharg_%s_%s",
    (Routes, UniqueNodes),
    cat = "Integer",
    lowBound = 0,
    upBound = (MaxDwellTime - CouplingTime - DecouplingTime),
)

# EiR = η ενέργεια που έχει το λεωφορείο όταν αναχωρεί από την στάση i της διαδρομής R (kWh)
E = pl.LpVariable.dicts(
    "E_%s_%s",

```

```

(Routes, UniqueNodes),
cat = "Continuous",
lowBound = SOCmin * BC, # 14 kWh
upBound = SOCmax * BC, # 56 kWh
)

# Initialize the PROBLEM 1
prob_x = pl.LpProblem("ChargingbusesWithX", pl.LpMinimize) # pulp.LpMinimize

'''
Αντικειμενική Συνάρτηση 1
'''
prob_x += ChargerCostX * sum(X[i] for i in TravelTimeDict)

prob_x.writeLP("ChargingBusesWithX.lp")
'''
Περιορισμός 1
'''
# Ορισμός επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας στην πρώτη στάση της κάθε διαδρομής
for R in Routes:
    # for i in Start: RoutesNetwork[R][0] is the first node of route R
    prob_x += (E[R][RoutesNetwork[R][0]] == SOCin * BC) # if you add les than 30 INFEASIBLE
    for most seeds

'''
Περιορισμός 2
'''
# Charging time is non-zero only if a charger is located at a stop and is limited by the dwell
time minus coupling and decoupling time
# tchargiR <= Xi*(dt-iR-tc-dtc) for all i,R in seconds

```

```

for R in Routes:
    for i in DwellTimeDict[R].keys(): # All nodes
        if i not in StartEndOnly: #for this RoutesNetwork this doesn't change anything
            prob_x += Tcharg[R][i] <= X[i] * (DwellTimeDict[R][i] - CouplingTime - DecouplingTime)

```

'''

Περιορισμός 3

'''

Energy Balance: Energy load after leaving node j on route R is equal to the energy load after leaving node

i on route R minus the energy consumption ECijl for the arc (i,j) plus the energy charged at stop j

$ER_j = ER_i - ECR_{ij} + tcharg_{Rj} * P_s * C_{ef}$

```

for R, route in enumerate(RoutesNetwork):

```

```

    for i in EnergyConsumptionDict[R].keys(): # i is never the last node

```

```

        # j is EC[R][i].keys()[0]: # this means j is NEVER the first in route, it is the key of the PREVIOUS NODE the link is (i,j)

```

```

            for j in EnergyConsumptionDict[R][i].keys():

```

```

                if j!=route[0] and j!=route[-1]:

```

```

                    prob_x += E[R][j] == E[R][i] - EnergyConsumptionDict[R][i][j] + Tcharg[R][j] * float(ChargerPowerX * ChargerEfficiencyX / 3600)

```

'''

Περιορισμός 4

'''

```

for R in Routes:

```

```

    for i in EnergyConsumptionDict[R].keys(): # we do not want i to be the last node, so EC[l].keys() is OK

```

```

        for j in EnergyConsumptionDict[R][i].keys(): # This gives the next node, i.e. for R = 0 and i = 8 we have the node j = 26

```

```

            # j gives the last node as well for the last link

```

```

            prob_x += E[R][i] >= EnergyConsumptionDict[R][i][j] + (SOCmin * BC) #14 + the energy consumption

```

```

'''
Περιορισμός 5
'''

for R in Routes:
    for i in EnergyConsumptionDict[R].keys():
        prob_x += E[R][i] <= SOCmax * BC

'''
Περιορισμός 7
'''

# X[i] == 0 only in Start or End stations that are not transfer stops
for node in UniqueNodes:
    if node in StartEndOnly:
        prob_x += X[node] == 0

prob_x.solve()

print("Status:", pl.LpStatus[prob_x.status])
prob_x.writeLP("ChargingBusesWithX.lp")

for v in prob_x.variables():
    print(v.name, "=", v.varValue)

results_x = prob_x.variables()

# print("Total Chargers Located at Internmediate Stops:",pl.lpSum(X[node].value() for node in
UniqueNodes))

EnergyBeforeTerminal = {}

for R, route in enumerate(RoutesNetwork):
    var = 'E_' + str(R) + '_' + str(route[-2])
    for result in results_x:

```

```

if result.name == var:
    EnergyBeforeTerminal[var] = result.varValue

'''
Περιορισμός 8
'''

EnergyInTerminal = {}
for R, route in enumerate(RoutesNetwork):
    var_before_terminal = 'E_' + str(R) + '_' + str(route[-2])
    var_terminal = 'E_' + str(R) + '_' + str(route[-1])
    EnergyInTerminal[var_terminal] = EnergyBeforeTerminal[var_before_terminal] -
    EnergyConsumptionDict[R][route[-2]][list(EnergyConsumptionDict[R][route[-2]].keys())[0]]
    #print(R, EnergyConsumptionDict[R][route[-2]][list(EnergyConsumptionDict[R][route[-2]].keys())[0]])

Hist = {}
for R, route in enumerate(RoutesNetwork):
    RoutesWithSameTerminal = []
    for R2, route2 in enumerate(RoutesNetwork):
        if route[-1] == route2[-1]:
            RoutesWithSameTerminal.append(R2)

    if route[-1] not in Hist.keys():
        Hist[route[-1]] = RoutesWithSameTerminal

'''
Περιορισμός 9
'''

EnergyNeed = {}
for node in EndSet:
    for RouteId in Hist[node]:
        var_terminal = 'E_' + str(RouteId) + '_' + str(node)

```

```

    if node in EnergyNeed.keys():
        EnergyNeed[node] += (SOCmax * BC - EnergyInTerminal[var_terminal]) *
Frequency[RoutelId][node]
    else:
        EnergyNeed[node] = (SOCmax * BC - EnergyInTerminal[var_terminal]) *
Frequency[RoutelId][node]

'''
Μεταβλητή Απόφασης 2 - περιορισμός 10
'''

# Yi: λαμβάνει τιμή 1 - 5 εάν χωροθετηθεί φορτιστής/ές στον τερματικό σταθμό i
Y = pl.LpVariable.dicts("Y_%s", (EndSet), cat = "Integer", lowBound = 0, upBound = 5)

# SRi = ο ρυθμός εξυπηρέτησης στις τερματικές στάσεις - προσέγγιση με την προσφορά
ενέργειας
SR = pl.LpVariable.dicts(
    "SR_%s",
    (EndSet),
    cat = "Integer",
    lowBound = 0,
)

# ARi = ο ρυθμός άφιξης στις τερματικές στάσεις στην διάρκεια μίας ώρας - προσέγγιση με
την ανάγκη σε ενέργεια
AR = pl.LpVariable.dicts(
    "AR_%s",
    (StartEnd),
    cat = "Continuous",
    lowBound = 0,
)

# Initialize the PROBLEM 2
prob_y = pl.LpProblem("ChargingbusesWithY", pl.LpMinimize) # pulp.LpMinimize

```



```

'''
Αντικειμενική Συνάρτηση 2
'''
prob_y += ChargerCostY * sum(Y[i] for i in EndSet)

prob_y.writeLP("ChargingBusesWithY.lp")
'''
Περιορισμός 11
'''
for node in EndSet:
    prob_y += SR[node] == Y[node] * ChargerPowerY

'''
Περιορισμός 12
'''
for node in EndSet:
    prob_y += AR[node] == EnergyNeed[node]

'''
Περιορισμός 13
'''
for node in EndSet:
    prob_y += SR[node] - AR[node] >= Y[node] * 1/t #0

prob_y.solve()

print("Status:", pl.LpStatus[prob_y.status])
prob_y.writeLP("ChargingBusesWithY.lp")
#print('Objective: ', prob_y.value())

```

```

for v in prob_y.variables():
    print(v.name, "=", v.varValue)

print("Total Chargers Located at Terminals:",pl.lpsum(Y[i].value() for i in EndSet))
print("Total Chargers Located at Intermediate Stops:",pl.lpsum(X[node].value() for node in
UniqueNodes))

TimeChargingTerminal = {} # minutes
for node in EndSet:
    for RouteId in Hist[node]:
        var_energy = 'E_' + str(RouteId) + '_' + str(node)
        var_time = 'T_' + str(RouteId) + '_' + str(node)
        TimeChargingTerminal[var_time] = (SOCmax * BC - EnergyInTerminal[var_energy]) * 60 /
ChargerPowerY

print("Charging Time at every Terminal at each Route:")
for element in TimeChargingTerminal:
    print(element + ' = ' + str(TimeChargingTerminal[element]))

sys.exit(0)

```
