



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΙΑΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ
ΛΕΩΦΟΡΕΙΩΝ ΣΤΑ ΜΕΣΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ**



ΜΟΥΡΑΤΗ ΕΛΠΙΔΑ

cv16742

Επιβλέπων :

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΓΚΙΟΤΣΑΛΙΤΗΣ – ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής Σχολή Πολιτικών Μηχανικών,
ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2024



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
DEPT. OF TRANSPORTATION PLANNING AND ENGINEERING
RAILWAYS AND TRANSPORT LABORATORY

DIPLOMA THESIS

DESIGN OF THE SCHEDULING OF ELECTRIC BUS CHARGING IN THE
MEANS OF TRANSPORT



MOURATI ELPIDA

cv16742

Supervisor :

KONSTANTINOS GKIOTSIALITIS – ASSISTANT PROFESSOR

Dept. of Transportation Planning and Engineering, School of Civil Engineering,
NTUA

Athens, March 2024

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας σηματοδοτεί την ολοκλήρωση των προπτυχιακών σπουδών μου στη Σχολή των Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ως εκ τούτου, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γκιωτσαλίτη Κωνσταντίνο Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την καθοδήγηση, την υποστήριξη, την άριστη συνεργασία και την εμπιστοσύνη που έδειξε ως προς το πρόσωπο μου, με την ανάθεση της εργασίας καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Νατάσσα και Νικόλα, αλλά και τον αδερφό μου Γιώργο, αναγνωρίζοντας το ιδιαίτερο ενδιαφέρον και την πολύπλευρη υποστήριξη που μου παρείχαν όλα τα χρόνια των σπουδών μου. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον σύντροφο μου, Στέλιο, για τη δική του ξεχωριστή υποστήριξη. Χωρίς την δική τους προσπάθεια τίποτα δεν θα είχε πραγματοποιηθεί.

Αθήνα, Μάρτιος 2024,

Μουράτη Ελπίδα,

ΕΜΠ

ΣΥΝΟΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο το βέλτιστο σχεδιασμό του χρονοπρογραμματισμού φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων σε μια ενιαία γραμμή διαμετακόμισης. Κατά την κατάστρωση του μοντέλου, βασικός στόχος ήταν η ελαχιστοποίηση του αριθμού των ηλεκτρικών λεωφορείων, καθώς και η βελτίωση των νεκρών χρόνων φόρτισης. Το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε, αποτελεί ένα πρόβλημα γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή του μοντέλου, με τη χρήση του solver βελτιστοποίησης GUROBI. Το προτεινόμενο μοντέλο, αποτελεί μια εκτεταμένη μορφή του μοντέλου των Jing Teng, Tong Chen & Wei David Fan (2019). Με την εφαρμογή του μοντέλου, προέκυψε ότι είναι εφικτή η εύρεση βέλτιστης λύσης. Για την αξιολόγηση του προτεινομένου μοντέλου, δημιουργήθηκαν σενάρια προβλημάτων τα οποία κάθε φορά διαφοροποιούνταν ως προς τον αριθμό οχημάτων, τον αριθμό σταθμών φόρτισης και τον αριθμό των ταξιδιών. Τέλος, για να καταγραφεί η συμπεριφορά του μοντέλου πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας, μεταβάλλοντας τις τιμές κάποιων παραμέτρων, με σκοπό να εντοπισθεί η σημαντικότητα αυτών και η συμβολή τους στο τελικό αποτέλεσμα και στη βέλτιστη λύση του μοντέλου.

Λέξεις κλειδιά: ηλεκτρικά λεωφορεία, βελτιστοποίηση δικτύου, υποδομή φόρτισης ηλεκτρικών λεωφορείων, χρόνος αναμονής, χωροθέτηση σταθμών φόρτισης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί ο σχεδιασμός του χρονοδιαγράμματος φόρτισης ηλεκτρικών λεωφορείων στο δίκτυο αστικών συγκοινωνιών υπό περιορισμένο χρόνο αναμονής στις τερματικές στάσεις του δικτύου, προκειμένου να προχωρήσει η ενσωμάτωση ηλεκτρικών λεωφορείων για να πραγματοποιηθεί σταδιακά η αντικατάσταση των λεωφορείων που κινούνται με ορυκτά καύσιμα σε ηλεκτρικά στο τυπικό δίκτυο μεταφορών, τα οποία είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον αλλά και στον χρήστη. Ωστόσο, τα ηλεκτρικά οχήματα είναι λιγότερα ευέλικτα από τα συμβατικά πετρελαιοκίνητα λεωφορεία λόγω της περιορισμένης αυτονομίας οδήγησης και των μεγαλύτερων χρόνων επαναφόρτισης.

Σημαντικό ρόλο στο δίκτυο των ηλεκτρικών λεωφορείων παίζει ο προγραμματισμός των οχημάτων σε μια ενιαία γραμμή διαμετακόμισης, καθώς και η βελτιστοποίηση του χρόνου φόρτισης και του αριθμού των οχημάτων.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται σχετικές έρευνες με το ζήτημα του χρονοπρογραμματισμού φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων, με σκοπό να εντοπιστούν όλες οι νέες τεχνολογίες, καθώς και τυχόν κενά στη βιβλιογραφία. Έπειτα, αναπτύσσεται ένα μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού, δημιουργώντας τα απαραίτητα στοιχεία και εφαρμόζοντας τα σε σενάρια. Οι περιορισμοί σχετίζονται με την καλή λειτουργία των δρομολογίων, τις συνθήκες φορτίσεις και την διάρκεια των χρονικών περιόδων. Η εφαρμογή του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του solver βελτιστοποίησης GUROBI. Από τα υπολογιστικά πειράματα που πραγματοποιήθηκαν προέκυψε ότι το μοντέλο έχει βέλτιστη λύση, ενώ εν συνεχεία καταγράφηκε η συμπεριφορά του μοντέλου, με τη μεταβολή κάποιων παραμέτρων όπως ο προϋπολογισμός του φορέα εκμετάλλευσης και ο χρόνος διαδρομής.

Τέλος, προτείνεται για περαιτέρω πεδίο έρευνας, η εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου για δεδομένα μεγαλύτερης κλίμακας.

ABSTRACT

This diploma thesis aims to redefine the charging schedule of electric buses in the urban public transport network, under a limited waiting time at the terminals of the network, in order to proceed with the integration of electric buses to gradually realize the replacement of fossil fuel powered buses to electric buses in the standard transport network. However, electric buses are less flexible than conventional diesel buses due to their limited driving range and longer recharging times.

An important role in the electric bus network is played by the scheduling of vehicles on a single transit line as well as the optimization of charging times and the number of vehicles.

In the following, relevant research on the issue of charging scheduling of electric buses is presented in order to identify all new technologies and any gaps in the literature. Then, a mathematical model of integer linear programming optimization is developed, creating the necessary elements and applying them to scenarios. The constraints are related to the efficient operation of the routes, the loading conditions and the duration of the time periods. For the implementation, the scenarios were executed in GUROBI optimization solver. From the computational experiments conducted, it emerged that the model has an optimal solution, and subsequently, the model's behavior was recorded by varying parameters such as the operator's budget and travel time.

Finally, it is proposed for further research to apply the given model to large-scale data.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ:

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	13
2.1.Εισαγωγή.....	13
2.1.1.Σχεδιασμός δικτύου με σημεία φόρτισης	14
2.1.2. Προγραμματισμός ηλεκτρικών λεωφορείων.....	16
2.1.3.Προβλήματα προγραμματισμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων	18
2.2.Μαθηματικά μοντέλα	19
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	27
4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	32
4.1. Εισαγωγή.....	32
4.2. Αριθμητικά πειράματα.....	32
4.3. Ανάλυση ευαισθησίας.....	35
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	38
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	40
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	42

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ:

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΣΥΝΟΠΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ	24
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	26
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ	28
ΠΙΝΑΚΑΣ 4:ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ	33
ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕΝΑΡΙΩΝ (A,B,C,D).....	34
ΠΙΝΑΚΑΣ 6:ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	35
ΠΙΝΑΚΑΣ 7:ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΟΥ ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ	36
ΠΙΝΑΚΑΣ 8:ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ.....	36

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μέρες μας, το μεγαλύτερο ποσοστό του παγκόσμιου πληθυσμού παρατηρείται ότι συγκεντρώνεται στα μεγάλα αστικά κέντρα. Το φαινόμενο της αστικοποίησης αποτελεί μια τάση της σύγχρονης εποχής και έχει απασχολήσει σημαντικά πολλούς επιστήμονες. Έρευνα από το United Nations (2018) επισήμανε ότι έως το 2030, οι αστικές περιοχές αναμένεται να στεγάσουν το 60% των ανθρώπων παγκοσμίως, ενώ εκτιμάται ότι ένας στους τρεις ανθρώπους θα ζει σε πόλεις με τουλάχιστον μισό εκατομμύριο κατοίκους. Με την αύξηση της συγκέντρωσης του πληθυσμού στα αστικά κέντρα, παρατηρείται δυσχέρεια στην κάλυψη των καθημερινών αναγκών των ατόμων κυρίως στον τομέα των μεταφορών. Η αύξηση του πληθυσμού προκάλεσε και σημαντική αύξηση και στον αριθμό των χρησιμοποιημένων οχημάτων. Σύμφωνα με τα στοιχεία της European Automobile Manufacture's Association, τους δύο πρώτους μήνες του 2023, η αγορά των νέων οχημάτων έφτασε σχεδόν τα 1,6 εκατομμύρια, παρουσιάζοντας αύξηση της τάξης του 11,4% σε σχέση με το προηγούμενο έτος. Εντούτοις, η συνεχής χρήση των συμβατικών οχημάτων συμβάλλει σημαντικά στη ρύπανση της ατμόσφαιρας και του περιβάλλοντος, με την εκπομπή αέριων ρύπων κυρίως CO₂ όπου προκαλεί την ένταση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Οι εκπομπές αέριων ενισχύουν τις συγκεντρώσεις ρύπων στην ατμόσφαιρα, αλλοιώνοντας σημαντικά τη σύσταση του αέρα και κατ' επέκταση την ποιότητα ζωής των ανθρώπων επιδεινώνοντας την υγεία τους. Επιπλέον, η καθημερινή χρήση συμβατικών οχημάτων συμβάλλει στην κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων καυσίμων, καθιστώντας τις χώρες ενεργειακά εξαρτημένες από τις πετρελαιοπαραγωγικές χώρες και είναι ευάλωτες στις πιθανότητες ενεργειακής πενίας.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, με την εξέλιξη της τεχνολογίας και της τεχνογνωσίας έχουν ανακαλυφθεί πιο καινοτόμες μέθοδοι στον τομέα των μεταφορών με στόχο τη μείωση του κόστους και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Στην έρευνα των Mahmoud at al.(2016), η ηλεκτροκίνηση αποτελεί μια από τις αναδυόμενες τάσεις της εποχής, ενώ ο ρόλος των ηλεκτρικών οχημάτων και συγκεκριμένα των ηλεκτρικών λεωφορείων στις δημόσιες επιβατικές μεταφορές είναι καθοριστικός στη λήψη μέτρων για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των ορυκτών καυσίμων. Σύμφωνα με την έρευνα του King.J. (2007-2010), οι εκπομπές αέριων ρύπων/χιλιόμετρο δύναται να μειωθούν έως το 2030 κατά 50% συγκριτικά με το 2000. Επιπλέον, σε έκθεση του ΕΟΠ για τα ηλεκτρικά οχήματα, αναφέρεται ότι οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά την χρήση ηλεκτρικών οχημάτων ήταν περίπου 17-30% χαμηλότερες συγκριτικά με αυτές των βενζινοκίνητων και πετρελαιοκίνητων αυτοκινήτων. Κατά συνέπεια, αναμένεται η παραγωγή ηλεκτρικών οχημάτων να γίνει πιο αποδοτική και οι μέθοδοι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας πιο πράσινες, με σκοπό κάθε χρόνο οι εκπομπές του κύκλου ζωής ενός τυπικού ηλεκτρικού οχήματος να μειωθούν τουλάχιστον κατά 73% μέχρι το 2050 (Erdélyi, 2023).

Η χρήση της ηλεκτροκίνησης στις μεταφορές και συγκεκριμένα στις δημοσιές συγκοινωνίες παρουσιάζει ορισμένες προκλήσεις όπως την περιορισμένη εμβέλεια οδήγησης, λόγω μικρής αυτονομίας μπαταρίας, καθώς και τους μεγάλους χρόνους επαναφόρτισης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων σήμερα ποικίλει από 100 km μέχρι 630 km. Δεδομένου ότι τα ηλεκτρικά οχήματα δεν διαθέτουν κινητήρα εσωτερικής καύσης και δεν καταναλώνουν υγρά καύσιμα κατά την κίνηση τους, η μπαταριά τους χρειάζεται να φορτίζεται τακτικά, μέσω της χρήσης

φορτιστών σε σταθμούς φόρτισης, οι οποίοι συχνά αντλούν ηλεκτρική ενέργεια από το τοπικό δίκτυο. Αναφορικά με τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων και πιο συγκεκριμένα των ηλεκτρικών λεωφορείων, αυτή προγραμματίζεται συνήθως τις βραδινές ώρες, όπου τα επίπεδα ζήτησης και εξυπηρέτησης των επιβατών μειώνονται. Οι χρόνοι φόρτισης αποτελούν μια από τις προκλήσεις της ηλεκτροκίνησης. Αυτοί εξαρτώνται άμεσα από τη χωρητικότητα του σταθμού, την μπαταρία του οχήματος, καθώς και το είδος της τεχνολογίας του φορτιστή (fast charges, ultra fast chargers). Στο άρθρο του U.S. Department of Energy δημοσιεύτηκε ότι ο χρόνος φόρτισης μπορεί να κυμαίνεται από λιγότερο από 20 λεπτά έως 20 ώρες ή περισσότερο, ανάλογα με τους παράγοντες αυτούς. Ωστόσο, δεδομένου ότι παρατηρείται εκθετική αύξηση των ηλεκτρικών οχημάτων από το European Automobile Manufacture's Association είναι σημαντικό να αντιμετωπιστούν ζητήματα, όπως εγκαταστάσεις φόρτισης στα μεγάλα αστικά κέντρα, με σκοπό να επιτευχθεί η αύξηση της αυτονομίας των ηλεκτρικών οχημάτων και η αύξηση του επιπέδου εξυπηρέτησης των πολιτών, αλλά και η μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος που προέρχεται από τον τομέα των μεταφορών.

Στο πλαίσιο, λοιπόν της μετάβασης των συμβατικών οχημάτων σε ηλεκτρικά, προωθείται και η μετάβαση στις πράσινες δημόσιες μεταφορές. Πιο συγκεκριμένα, πολλές χώρες έχουν προχωρήσει στην μετατροπή του στόλου των λεωφορείων τους σε ηλεκτρικά, ενώ παρατηρείται και η διεξαγωγή διαδρομών από μικτά οχήματα (συμβατικά και ηλεκτρικά), καθώς καταγράφονται πολλές ελλείψεις στο δίκτυο για την ομαλή κίνηση των ηλεκτρικών λεωφορείων.

Στην Ελλάδα ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων είναι ακόμα πολύ μικρός. Ωστόσο, υπάρχει μία μικρή αυξητική τάση στον συνολικό αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων. Για την διάδοση της ηλεκτροκίνησης είναι απαραίτητη η κατανόηση της στάσης του κοινού απέναντι στα ηλεκτρικά οχήματα, έτσι ώστε να ληφθούν τα καταλληλά μέτρα για την προώθηση τους.

Η παρούσα διπλωματική έχει ως στόχο τον προγραμματισμό του χρόνου φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων στο δίκτυο μεταφοράς. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τα ηλεκτρικά οχήματα και τη χρήση τους, τις υποδομές φόρτισης και τις πολιτικές προώθησης τους.

Η επίλυση του μοντέλου πραγματοποιείται μέσω του Solver Gurobi και αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Python.

Για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας του μοντέλου, πραγματοποιήθηκαν κάποιες δοκιμές σε προβλήματα μικρής κλίμακας, δηλαδή σε μια μικρή περιοχή όπου υπάρχουν συγκεκριμένα δρομολόγια λεωφορείων λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραμέτρους.

Τέλος, η παρούσα εργασία θέτει ως στόχο την εύρεση του βέλτιστου προγραμματισμού των ηλεκτρικών λεωφορείων σε ένα δεδομένο οδικό δίκτυο, με κύριο στόχο, τη μείωση του κόστους και την αύξηση του επιπέδου εξυπηρέτησης των πολιτών.

Το πρώτο (1^ο) κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή του κεντρικού θέματος της διπλωματικής εργασίας, όπου γίνεται αναφορά της σημαντικότητας του.

Το δεύτερο (2^ο) κεφάλαιο γίνεται ανασκόπηση της υφισταμένης βιβλιογραφίας ως προς τα ηλεκτρικά λεωφορεία, τον επανασχεδιασμό δικτύου, καθώς επίσης και της βελτιστοποίησης της χωροθέτησης των εγκαταστάσεων φόρτισης για τον σχεδιασμό ενός δικτύου με ηλεκτρικά λεωφορεία. Μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης εντοπίζονται τυχόν κενά, τα οποία χρήζουν περαιτέρω έρευνα.

Το τρίτο (3^ο) κεφάλαιο περιλαμβάνει την ανάλυση της μεθοδολογίας για το σχεδιασμό του προτεινομένου μοντέλου και η ανάλυση αυτού, καθώς και των παραμέτρων που λήφθηκαν υπόψη στην κατάστρωση του.

Στο τέταρτο (4^ο) κεφάλαιο πραγματοποιούνται υπολογιστικά πειράματα για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας του μοντέλου, και την εύρεση των βέλτιστων λύσεων για μικρής κλίμακας δεδομένα.

Στο πέμπτο (5^ο) κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων, καθώς και ο σχολιασμός τους. Επίσης, καταγράφονται και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1.Εισαγωγή

Το κεφάλαιο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης περιλαμβάνει την παρουσίαση και την ανάλυση ερευνών οι οποίες μελετούν εκτενώς το πρόβλημα του χρονοπρογραμματισμού φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων, μέσω της ανάπτυξης μαθηματικών μοντέλων, λαμβάνοντας διαφορετικές παραμέτρους για το καθένα από αυτά. Ταυτόχρονα επισημαίνουμε στη βιβλιογραφική ανασκόπηση την σύνοψη της κάθε εξεταζόμενης εργασίας που περιλαμβάνει το πλαίσιο της ερευνάς, τη μεθοδολογία και τα βασικά αποτελέσματα. Τέλος, ο εντοπισμός τυχόν κενών στην έως τώρα βιβλιογραφία θα πραγματοποιηθεί με τη δημιουργία συνοπτικών πινάκων, ώστε να συγκεντρωθούν όλες οι έρευνες που έχουν διεξαχθεί αναφορικά με το πρόβλημα βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού ηλεκτρικών λεωφορείων, ώστε να γίνει ο εντοπισμός των σημείων, τα οποία χρήζουν βελτίωση.

Στη συνέχεια, ο βασικός στόχος της ανασκόπησης ως προς τα αποτελέσματα από τις έρευνες που σχετίζονται με το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι να παρουσιαστούν όλες οι μελέτες επιτρέποντας τον προσδιορισμό του αντικειμένου και την μέθοδο επίλυσης. Επιπλέον, η ανασκόπηση των ερευνών επιτρέπει τον έλεγχο εάν τα αποτελέσματα της διπλωματικής σχετίζονται με εκείνα της διεθνούς βιβλιογραφίας, ώστε να επεξεργάζονται πιο ευκολά στην ερμηνεία τους.

Οι έρευνες και οι μελέτες που έχουν δημοσιευτεί μέχρι και σήμερα, εμφανίζουν ποικιλομορφία σε ότι αφορά μεθόδους μοντελοποίησης και επίλυσης, περιορισμούς, καθώς και τους στόχους τους εκάστοτε μοντέλου. Επιπρόσθετα, κάθε μια από τις μελέτες αναπτύσσουν μαθηματικά μοντέλα, συχνά κοινά, που προσαρμόζονται κάθε φορά καλύτερα στα δεδομένα.

2.1.1. Σχεδιασμός δικτύου με σημεία φόρτισης

Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται μελέτες με σκοπό την ανάδειξη και ερμηνεία μιας ενιαίας γραμμής διαμετακόμισης στο δίκτυο μεταφοράς. Ο Σχεδιασμός των Μεταφορικών Συστημάτων αναφέρεται τόσο στα φυσικά αντικείμενα που απαιτούν αναλυτική μελέτη και σχεδιασμό, όσο και σε μηχανισμούς που περιγράφουν τη λειτουργία και απόδοση τους και συνδέονται με μη-φυσικά αντικείμενα, όπως εκείνα της ζήτησης και της συμπεριφοράς των χρηστών. Αποτελούνται από επιμέρους υποσυστήματα που αλληλοεπηρεάζονται άμεσα ή έμμεσα, με γραμμικές ή μη-γραμμικές σχέσεις και αντιδράσεις. Η δυσκολία αλλά και η πρόκληση αυτών των συστημάτων είναι η ενδογενής πολυπλοκότητά τους, που επιτείνεται από το γεγονός ότι ο χρονικός ορίζοντας του σχεδιασμού των υποδομών εκτείνεται αρκετές δεκαετίες στο μέλλον (Α.Σταθόπουλος, 2016).

Σαν πρωταρχικό βήμα, σε ένα σύστημα αστικών μεταφορών είναι η σχεδίαση του δικτύου. Σύμφωνα με το βιβλίο των Καρλαύτη και Λυμπέρη (2009), ο σχεδιασμός των μεταφορικών μέσων σε μια κοινωνία δημιουργείται από την ανάγκη των επιβατών για μετακίνηση. Η τάση για πολλές δραστηριότητες οδηγεί στην πραγματοποίηση μεγάλου αριθμού μετακινήσεων. Επιπλέον, επιδιώκοντας ποιοτικότερες συνθήκες ζωής, εντός ενός χώρου ο οποίος επιβαρύνεται από υποδομές, ζώντας σε ένα κοινωνικό περιβάλλον όπου οι ρυθμοί ζωής γίνονται όλο και πιο ταχείς, ο κάτοικος της πόλης επιθυμεί ταχύτητα και άνεση στις μετακινήσεις του. Ο Σταθόπουλος (2016) ανέφερε ότι με αυτό τον τρόπο, ο σχεδιασμός ενός δικτύου έχει κύριο στόχο την βελτίωση της κινητικότητας προς τις δραστηριότητες, που μπορεί να έχουν διάφορες μορφές, όπως η μετάβαση ή η πρόσβαση στην εργασία ή σε χώρους μόρφωσης, αναψυχής, υγείας κλπ. Ωστόσο, ο σχεδιασμός του δικτύου καθορίζεται για να παρέχει άμεση ή έμμεση σύνδεση μεταξύ θέσεων ή περιοχών που προσελκύουν ζήτηση. Το σχήμα των γραμμών ενός δικτύου είναι συχνά περιορισμένο από το μήκος και την αμεσότητα ως προς τις στάσεις, την σύνδεση με την παράλληλη κάλυψη με τις άλλες γραμμές, καθώς και την χρήση των δεδομένων δρόμων. Έτσι, επιθυμούμε ένα δίκτυο όπου το σύνολο των γραμμών να συνδέει εύκολα διαφορετικές περιοχές μέσα στη ίδια ζώνη σχεδιασμού.

Εν συνεχεία, το πιο σημαντικό είναι η τοποθέτηση των σημείων φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων. Κατά τον σχεδιασμό ενός μεταφορικού συστήματος και ειδικότερα για τα ηλεκτρικά λεωφορεία το πιο σημαντικό είναι η σχεδίαση και η αρμονική ένταξη στο αστικό περιβάλλον, ώστε η τελική τους μορφή να ικανοποιεί τόσο τις πρακτικές ανάγκες φόρτισης ως προς το σημείο τοποθέτησης, την ευκολία στην πρόσβαση αλλά και την απόσταση μεταξύ των σταθμών.

Η φόρτιση των μπαταριών των ηλεκτρικών λεωφορείων δεν είναι τόσο απλή όσο ο ανεφοδιασμός ενός κινητήρα ντίζελ. Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, παρακολούθηση και προγραμματισμός για τη βέλτιστη αξιοποίηση της διαδικασίας φόρτισης, ενώ παράλληλα διασφαλίζεται η σωστή συντήρηση και η φύλαξη των μπαταριών. Όπως αναφέρει ο Young-Dae Ko (2011), ο κύριος τρόπος φόρτισης για τα ηλεκτρικά λεωφορεία (E-buses) είναι η ενσύρματη φόρτιση, η οποία έχει δυο επιλογές, η φόρτιση με σύνδεση (πχ. σε σταθμούς φόρτισης ή τερματικούς σταθμούς λεωφορείων) και η φόρτιση με εναλλαγή μπαταριών. Η πιο διαδομένη μορφή φόρτισης είναι η φόρτιση με πρίζα, η οποία πραγματοποιείται σε σταθμούς φόρτισης κοντά σε τερματικές στάσεις.

Η εγκατάσταση σταθμών φόρτισης plug-in κατά μήκος των διαδρομών των λεωφορείων έχει ιδιαίτερη σημασία για την ευρεία υιοθέτηση των ηλεκτρικών λεωφορείων. Όπως επίσης σύμφωνα με την έρευνα των Schunk-group, οι καινοτόμοι παντογράφοι που τοποθετούνται στην οροφή και οι ανεστραμμένοι παντογράφοι επιτρέπουν την αξιόπιστη φόρτιση των μπαταριών των ηλεκτρικών λεωφορείων στη γραμμή ή στο αμαξοστάσιο μέσα σε δευτερόλεπτα. Οι αποθήκες ή οι τερματικοί σταθμοί αφετηρίας και προορισμού είναι πιθανοί χώροι για τη δημιουργία σταθμών φόρτισης για ένα σύνολο λεωφορείων. Επιπλέον, για μεγαλύτερες αποστάσεις μπορεί να απαιτείται φόρτιση κατά τη διαδρομή ή ενδιάμεση φόρτιση. Τα λεωφορεία μπορούν να φορτιστούν κατά τη διάρκεια της νύχτας όταν δεν λειτουργούν και κατά τη διάρκεια οποιουδήποτε διαθέσιμου ελεύθερου χρόνου κατά τις ώρες λειτουργίας.

Παράλληλα, απαιτείται και σχολαστικός σχεδιασμός για τον προγραμματισμό των φορτίσεων στα σημεία φόρτισης μετά την ολοκλήρωση των δρομολογίων κατά την διάρκεια των ωρών λειτουργίας, καθώς ο χρόνος φόρτισης θα μπορούσε εύκολα να διαταράξει τη λειτουργία του λεωφορείου. Η EvConnect παραδέχτηκε ότι ο σχεδιασμός της φόρτισης των λεωφορείων έχει ιδιαίτερη σημασία για να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή αξιοποίηση των εγκαταστημένων EVSE¹ (electric vehicle supply equipment) που εξυπηρετούν τη ζήτηση φόρτισης στις αποθήκες. Όταν χρησιμοποιείται ο φορτιστής εναλλασσόμενου ρεύματος, τότε φορτίζετε ένα ενσωματωμένο σύστημα φόρτισης στο εσωτερικού του ηλεκτρικού λεωφορείου, το οποίο μετατρέπει την ενέργεια σε ηλεκτρική συνεχούς ρεύματος και την αποστέλλει στην μπαταρία. Όπως είναι κατανοητό, η φόρτιση με συνεχές ρεύμα είναι ταχύτερη και στην πραγματικότητα αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος των φορτιστών. Επιπλέον, είναι χρήσιμο να διατηρηθεί η συχνότητα εξυπηρέτησης της γραμμής στα ίδια επίπεδα με τη βασική γραμμή ώστε να φορτίζεται ένα λεωφορείο μόνο όταν δεν μπορεί να πραγματοποιήσει άλλο ταξίδι με την ήδη εναπομένουσα φόρτιση της μπαταρίας. Απαιτείται η αντικατάσταση των υφιστάμενων λεωφορείων σε μια διαδρομή με ισάριθμα ηλεκτρικά λεωφορεία ώστε να διασφαλιστεί ότι το μέγεθος του στόλου παραμένει το ίδιο. Ένα αποτελεσματικό πλαίσιο για τον προγραμματισμό των αναγκών φόρτισης των λεωφορείων πρέπει να είναι συγχρονισμένο με τις λειτουργικές παραμέτρους μιας υπηρεσίας λεωφορείων εντός της πόλης.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό είναι ο καθορισμένος χρόνος για τη φόρτιση του λεωφορείου. Πιο συγκεκριμένα, ο καθορισμένος χρόνος θα μπορούσε να είναι οι ώρες λειτουργίας του δικτύου ώστε να μην χρειάζονται φόρτιση κατά την διάρκεια της νύχτας. Αν τα λεωφορεία εκμεταλλευτούν την φόρτιση κατά τη διάρκεια της νύχτας, τότε ο αριθμός των απαιτούμενων φορτιστών μπορεί να είναι μικρότερος σε περίπτωση που η διαδρομή είναι μικρότερη από τον πραγματικό χρόνο φόρτισης.

Ο σχεδιασμός και ο προγραμματισμός της υποδομής φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων βρίσκεται ακόμη σε εξέλιξη, με διάφορες μελέτες να επικεντρώνεται σε διάφορες πτυχές, όπως ο χρονοπρογραμματισμός, το κόστος, η χωρητικότητα της μπαταρίας κλπ. Επίσης, παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία ως προς την μεθοδολογία και το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του κάθε προβλήματος.

¹ EVSE: εξοπλισμός τροφοδοσίας ηλεκτρικών οχημάτων, η πιο κοινή ονομασία του, ο σταθμός φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.

2.1.2. Προγραμματισμός ηλεκτρικών λεωφορείων

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν μελετηθεί πολλά προβλήματα που σχετίζονται με τον προγραμματισμό στις δημοσίες μεταφορές. Μεταξύ αυτών, το πιο κλασικό είναι το τυπικό πρόβλημα προγραμματισμού VSP (Vehicles Scheduling Process). Σε έρευνα της Maria Gulnara Baldoquin και του Alvaro Jose Rengifo-Campo, το πρόβλημα προγραμματισμού οχημάτων VSP είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης του επιχειρησιακού σχεδιασμού των συστημάτων δημοσίων μεταφορών. Στο VSP, ανατίθεται καθήκοντα σε λεωφορεία για την κάλυψη ενός δεδομένου συνόλου δρομολογίων, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές πρακτικές. Επίσης, σε έρευνα των S.Bunte et al., επισημαίνουν ότι το κάθε όχημα ανατίθεται σε μια αλυσίδα δρομολογίων, αν και ορισμένα από αυτά μπορεί να είναι δρομολόγια με αδιέξοδο, προκειμένου να επιτευχθεί η βελτιστοποίηση. Κάθε λεωφορείο μπορεί να εξυπηρετήσει ένα ταξίδι κάθε φορά και κάθε ταξίδι κωδικοποιείται ως ένα χρονικό διάστημα που πρέπει να ανατεθεί σε ένα μόνο όχημα.

Πιο συγκεκριμένα, για να βελτιωθεί η χρήση των ηλεκτρικών λεωφορείων, πρέπει να ενσωματωθούν οι λειτουργίες φόρτισης των μπαταριών στον προγραμματισμό της κατανομής των λεωφορείων. Αυτό οδηγεί στο πρόβλημα προγραμματισμού ηλεκτρικών οχημάτων Electric Vehicle Scheduling Problem (E-VSP) που παρουσιάστηκε από τους M.Wen et al.(2016). Κάθε ταξίδι περιέχει μια ώρα έναρξης στο σημείο αναχώρησης και μια ώρα λήξης στο σημείο άφιξης, ενώ η διάρκεια ενός ταξιδιού ονομάζεται χρόνος ταξιδιού. Το καθημερινό έργο του οχήματος αρχίζει με την έξοδο από την αποθήκη, ακολουθείται από μια σειρά διάδρομων και τελειώνει με την είσοδο στην αποθήκη. Ο χρόνος αναμονής και η κίνηση μεταξύ δυο διαδοχικών διάδρομων ονομάζεται χρόνος αδράνειας ή νεκρός χρόνος διαδρομής. Οι Yindong Shen et al. ανέφεραν ότι στη πράξη, εάν το διάστημα μεταξύ δυο διαδοχικών διάδρομων είναι αρκετά μεγάλο (π.χ. πάνω από 3 ώρες), ένα όχημα αναγκάζεται να επιστρέψει προσωρινά σε μια αποθήκη, η οποία ονομάζεται επιστροφή στην αποθήκη. Ενώ ο Alan Millner (2010) επισήμανε ότι εκτός από την ανάθεση δρομολογίων στα λεωφορεία, μια εφικτή λύση στο E-VSP είναι να σχεδιάσει ένα πρόγραμμα φόρτισης, όπου διασφαλίζει την πιο εφικτή λειτουργία της μπαταρίας εντός του αποδεκτού εύρους κατάστασης φόρτισης (SoC), μια χρήση της μπαταρίας εκτός εύρους μπορεί να μειώσει σημαντικά τη διάρκεια ζωής της. Ωστόσο, η εμβέλεια οδήγησης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι περιορισμένη όπως αναφέρει ο Li (2023), όπου η ηλεκτρική ενέργεια της μπαταρίας ενός ηλεκτρικού οχήματος συνήθως δεν επαρκεί για να ταξιδέψει ολόκληρη την ημέρα και πρέπει να επαναφορτιστεί, γεγονός που πρέπει να ληφθεί υπόψη στον προγραμματισμό του. Επιπλέον, η στιγμή κατά την οποία ένα όχημα αρχίζει να επαναφορτίζεται και η χρονική διάρκεια της πρέπει να αποφασίζονται κατά τη διαδικασία του προγραμματισμού.

Σύμφωνα με τους Yahong Liu et al.(2022), οι τρέχουσες μελέτες για τα EVSPs χρησιμοποιούν συνήθως τον τρόπο της πλήρους επαναφόρτισης ή της αντικατάστασης της μπαταρίας. Πιο αναλυτικά, όταν ένα ηλεκτρικό όχημα χρειάζεται επαναφόρτιση, τότε φορτίζεται πλήρως ή η μπαταρία του αντικαθίσταται με μια νέα πλήρως φορτισμένη. Στην πραγματικότητα, δεν είναι απαραίτητη η πλήρης επαναφόρτιση ενός ηλεκτρικού οχήματος, όταν ένα όχημα έχει να ολοκληρώσει μόνο λίγες διαδρομές. Σε αυτή την περίπτωση, η μερική επαναφόρτιση είναι αρκετή για τις υπόλοιπες διαδρομές και ο χρόνος επαναφόρτισης είναι μικρότερος από εκείνον του οχήματος που

επαναφορτίζεται πλήρως. Επιπλέον, υπάρχουν ορισμένες μελέτες για το E-VSP που υιοθετούν το σχήμα κωδικοποίησης με βάση τον χρόνο έναρξης, το μήκος του οποίου ισούται με τον αριθμό των χρόνων και κάθε στοιχείο αντιπροσωπεύει έναν χρόνο έναρξης στο χρονοδιάγραμμα.

Ωστόσο, οι Mehdi Etezadi-Amoli et al.(2010) και οι Samuel Pelletier et al.(2016) παραθέτουν ότι το E-VSP είναι ακόμη πιο πολύπλοκο αν περιορίσουμε τον αριθμό των ταυτοχρόνων εργασιών φόρτισης που πραγματοποιούνται στον τερματικό σταθμό. Ένας τέτοιος περιορισμός απαιτείται όταν υπάρχει σταθερός αριθμός φορτιστών ανά σταθμό φόρτισης με την μέγιστη χωρητικότητα ισχύος του δικτύου. Με αυτό τον τρόπο είναι χρήσιμο να υπάρχει ένα πρόγραμμα φόρτισης που θα ακολουθεί την σειρά των εργασιών της μπαταρίας και ονομάζεται πρόγραμμα φορτιστών. Ωστόσο, όπως παρουσίασαν και στη μελέτη τους οι Matias Alvo et al.(2021), το E-VSP έχει περιορισμένο αριθμό ταυτόχρονων εργασιών φόρτισης, οι οποίες είναι αλληλένδετες αποφάσεις μεταξύ τους και είναι τρεις:

1. Σχεδιασμός εφικτών χρονοδιαγραμμάτων διαδρομών για κάθε λεωφορείο που καλύπτουν τις διαδρομές,
2. Σχεδιασμός εφικτών χρονοδιαγραμμάτων φόρτισης μπαταριών για κάθε λεωφορείο και
3. Ανάθεση και αλληλουχία χρονοδιαγραμμάτων φορτιστών σε κάθε φορτιστή.

Αναλυτικότερα και οι Shyam S.G.Perumal, Richard M.Lusby και Jesper Larsen (2022) έδειξαν ενδιαφέρον για το E-VSP, το οποίο αφορά την ανάθεση ηλεκτρικών λεωφορειών σε ένα σύνολο δρομολογίων με χρονοδιάγραμμα, ικανοποιώντας παράλληλα τις απαιτήσεις τους για την εμβέλεια οδήγησης και την επαναφόρτιση. Επιπλέον, τα μοντέλα και οι μέθοδοι επίλυσης που περιγράφονται στη βιβλιογραφία για το VSP έχουν εφαρμοστεί και για την επίλυση του E-VSP. Κατά των Welverton R.Silva et.al.(2023), η κύρια διαφορά μεταξύ του E-VSP και άλλων προβλημάτων κοινής χρήσης ηλεκτρικών αυτοκινήτων που σχετίζονται με τη βιβλιογραφία της επιχειρησιακής έρευνας είναι τα κριτήρια ικανοποίησης των πελατών, δηλαδή όταν ικανοποιείται η ζήτηση οδήγησης ενός πελάτη, πρέπει να ικανοποιούνται και όλες οι άλλες απαιτήσεις του. Στην παρούσα εργασία, παρέχουμε μια λεπτομερή βιβλιογραφική ανασκόπηση των προσεγγίσεων επίλυσης που έχουν προταθεί για την επίλυση του E-VSP και των διάφορων προβλημάτων βελτιστοποίησης που σχετίζονται με το σχεδιασμό και τον προγραμματισμό των ηλεκτρικών λεωφορειών.

Από όσα γνωρίζουμε μέχρι στιγμής δεν υπάρχουν πολλές έρευνες που να προσεγγίζουν με μεγάλη ακρίβεια το E-VSP, λαμβάνοντας υπόψη τις αποφάσεις για την αλληλουχία, τη διάρκεια των εργασιών φόρτισης αλλά και τον αριθμό των λεωφορειών που φορτίζουν παράλληλα σε συνεχή χρονικό ορίζοντα.

2.1.3. Προβλήματα προγραμματισμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Με την αυξανόμενη χρήση ηλεκτρικών λεωφορείων σε όλο τον κόσμο, το πρόβλημα του προγραμματισμού των ηλεκτρικών οχημάτων έχει προκαλέσει αυξημένο ενδιαφέρον, στοχεύοντας στην σταδιακή μετάβαση του στόλου των λεωφορείων από συμβατικά σε ηλεκτρικά, καθώς και την αποτελεσματική ενσωμάτωση των τελευταίων στις δημοσίες συγκοινωνίες. Οι μέθοδοι επίλυσης των ήδη υφιστάμενων ερευνών παρουσιάζουν ποικιλία ως προς τους στόχους και τη μεθοδολογική προσέγγιση τους. Για αυτό τον λόγο, χρησιμοποιούνται διάφορες μεθοδολογίες, μια εκ των οποίων είναι ο μαθηματικός προγραμματισμός για την επίλυση προβλημάτων. Κατά τον Richard Bronson (1997), σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης (optimization problem) επιδιώκεται η μεγιστοποίηση ή η ελαχιστοποίηση μιας συγκεκριμένης ποσότητας, η οποία ονομάζεται αντικειμενική (objective) και εξαρτάται από έναν πεπερασμένο αριθμό μεταβλητών εισόδου. Αυτές οι μεταβλητές μπορεί να είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους ή μπορεί να συνδέονται με έναν ή περισσότερους περιορισμούς (constraints). Η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί έχουν την μορφή μαθηματικών συναρτήσεων και συναρτησιακών σχέσεων. Έτσι έρευνα των AIMMS Documentation (2021), αναλύει ότι η βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης αποτελείται από ένα σύνολο μεταβλητών απόφασης και σταθερών παραμέτρων.

Η πρώτη κατηγορία, η αντικειμενική συνάρτηση είναι απαραίτητη για την επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης. Είναι ένας απλός τύπος που υπολογίζει την ποσότητα που πρέπει να βελτιστοποιηθεί, με άλλα λόγια χρησιμοποιεί τη συσχέτιση των μεταβλητών για να καθορίσει την αξία του τελικού αποτελέσματος (Shaun Conrad, 2023). Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική. Σύμφωνα με τη AIMMS Documentation, οι περιορισμοί είναι η διαδικασία επίλυσης ενός συστήματος. Οι περιορισμοί αποτελούνται από ένα σύνολο αγνώστων διακριτών μεταβλητών, ενδεχομένως μαζί με μια αντικειμενική συνάρτηση που πρέπει να μεγιστοποιηθεί ή να ελαχιστοποιηθεί.

Οι περιορισμοί μπορούν να καταταχθούν ως:

1. Συνεχής (continuous)
2. Ακέραιος (integer)
3. Μικτός ακέραιος (mixed-integer)

Ωστόσο, στο μαθηματικό προγραμματισμό παίζουν σημαντικό ρόλο και οι μέθοδοι επίλυσης ενός προβλήματος βελτιστοποίησης. Οι μέθοδοι επίλυσης του προγραμματισμένου χρόνου φόρτισης μπορούν να ποικίλλουν αλλά οι πιο βασικές είναι οι ευρετικές μέθοδοι (Heuristics), οι οποίες δεν ήταν ικανές να ανταπεξέλθουν σε μεγάλα δίκτυα αλλά σε πιο μικρά και να παρουσιάζουν ακριβείς λύσεις, όμως συντέλεσαν στο να αναπτυχθούν οι μεθευρετικές μέθοδοι (Metaheuristics). Οι μεθευρετικές ορίζονται ως ευρετικές υψηλού επιπέδου που χρησιμοποιούνται για να καθοδηγήσουν άλλες ευρετικές για καλύτερη αναζήτηση, αλλά δεν μπορούν πάντα να βρουν την βέλτιστη λύση (Gavrilas, 2010). Τα τελευταία χρόνια, οι μεθευρετικές μέθοδοι είναι ο κύριος τρόπος λύσης των δύσκολων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Όπως αναφέρει ο Harder (2023), οι ακριβείς αλγόριθμοι (exact) παρουσιάζουν λύσεις με την υψηλότερη δυνατή ποιότητα αλλά, όμως αν το πρόβλημα είναι πραγματικά μεγάλο θα χρειαστεί πολύ χρόνο, ώρες ή ημέρες, για να φτάσει στη βέλτιστη λύση.

Ωστόσο, συχνά χρησιμοποιούνται ο συνδυασμός των μεθόδων λύσεων για την καλύτερη απόδοση του μοντέλου.

Παρακάτω ακολουθεί μια αναλυτική περίληψη από διάφορες ερευνητικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στο πρόβλημα του χρονοπρογραμματισμού φόρτισης, καθώς και ένας συγκεντρωτικός πίνακας μεθοδολογιών σημαντικών ερευνών που έχουν διεξαχθεί στο προγραμματισμό χρόνου φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων.

2.2.Μαθηματικά μοντέλα

Τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερες μελέτες επικεντρώνουν το ενδιαφέρον τους στην ενσωμάτωση των ηλεκτρικών λεωφορείων στο σύστημα δημοσίας συγκοινωνίας. Σαν αποτέλεσμα, δημιουργήθηκαν αρκετές έρευνες που περιέγραψαν αρκετά λεπτομερώς, το πρόβλημα βελτιστοποίησης του χρονοπρογραμματισμού φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων, από την άποψη της καθημερινής λειτουργίας και των αμοιβαίων περιορισμών μεταξύ των διάφορων στοιχείων του προβλήματος.

Μια πρόσφατη ερευνά που επικεντρώθηκε πάνω στα προβλήματα της φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων είναι των Liu Kai et al.(2021), η οποία αναδεικνύει μια σειρά πρακτικών προβλημάτων, όπως το υψηλό κόστος φόρτισης, η παραλογή χρήση των πόρων φόρτισης και τα χαοτικά χρονοδιαγράμματα. Λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας των πόρων, ο προσδιορισμός του εύλογου προγραμματισμού φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων για τη μείωση του κόστους είναι ζωτικής σημασίας για την περαιτέρω ανάπτυξη των ηλεκτρικών λεωφορείων. Στην παρούσα μελέτη, το πρόβλημα της φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων μοντελοποιήθηκε, ως πρόβλημα μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού, στο οποίο δόθηκε έμφαση στην επίδραση της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της χρήσης και στη συνέχεια στη βελτιστοποίηση της φόρτισης. Εν τω μεταξύ, για να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα του μοντέλου σε σενάρια φόρτισης μεγάλης κλίμακας, αναπτύσσεται ένας ευρετικός αλγόριθμος βασισμένος στη δημιουργία στηλών για την αποσύνθεση του αρχικού μοντέλου σε ένα κύριο πρόβλημα και σε υποπροβλήματα. Έτσι, η στρατηγική της φόρτισης σε κάθε ηλεκτρικό λεωφορείο επιλύεται σε ένα ανεξάρτητο υποπρόβλημα. Κατά συνέπεια, εξασφάλισε ένα πιο σταθερό λειτουργικό πρόγραμμα των λεωφορείων και αποφεύχθηκε η διαλείπουσα φόρτιση. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η βέλτιστη λύση φόρτισης μπορεί να μειώσει το κόστος φόρτισης κατά 36,1% σε σύγκριση με την μη ελεγχόμενη φόρτιση.

Αξιοσημείωτη είναι και η έρευνα των Xindi Tang et al.(2019), που παρουσίασαν το πρόβλημα προγραμματισμού δρομολογίων ηλεκτρικών λεωφορείων για την αντιμετώπιση της πρόκλησης που θέτει η στοχαστικότητα των συνθηκών αστικής κυκλοφορίας. Η μελέτη έχει ως στόχο να αποφύγουν κατά τη διαδρομή τυχόν βλάβη των ηλεκτρικών λεωφορείων, να μειώσουν το κόστος καθυστέρησης και να επιτύχουν ευρωστία. Έτσι, προτείνουν τόσο στατικά όσο και δυναμικά μοντέλα προγραμματισμού. Το στατικό μοντέλο εισάγει μια στρατηγική απομονωμένης απόστασης για την αντιμετώπιση των δυσμενών επιπτώσεων που προκαλεί η στοχαστικότητα του χρόνου διαδρομής. Ενώ το δυναμικό μοντέλο εκμεταλλεύεται τις συνεχώς επικαιροποιημένες συνθήκες της οδικής κυκλοφορίας και επαναπρογραμματίζει περιοδικά τον στόλο ηλεκτρικών λεωφορείων κατά τη διάρκεια μιας ημέρας λειτουργίας. Ένα πλαίσιο διακλάδωσης και τιμών επεκτείνεται για την αποτελεσματική επίλυση και των δυο μοντέλων S-VSP και D-VSP. Τα μοντέλα είναι

μικτά ακέραια γραμμικά προγράμματα, το πρώτο είναι για συμβατικά οχήματα με καύσιμα ενώ το δεύτερο περιλαμβάνει πολλούς προσθέτους περιορισμούς. Οι περιορισμοί αφορούν την εμβέλεια της μπαταρίας και τη χωρητικότητα του σταθμού φόρτισης, όπου αντιστοιχούν σε διαφορετικά σενάρια κυκλοφορίας. Χρησιμοποιώντας τα ρεαλιστικά δεδομένα λειτουργίας των λεωφορειακών γραμμών στο Πεκίνο, διεξάγονται αριθμητικά παραδείγματα για να προσομοιώσουν τις επιδόσεις των προτεινομένων μοντέλων και να αντλήσουν ορισμένες σημαντικές πληροφορίες. Όπως υποδεικνύεται από τα αριθμητικά αποτελέσματα, τα προτεινόμενα μοντέλα, μπορούν να αποφύγουν αποτελεσματικά τις βλάβες κατά την διαδρομή, διατηρώντας παράλληλα την αποδοτικότητα του κόστους.

Στο ίδιο πλαίσιο είναι και η μελέτη των M.Wen et al.(2016), η οποία είχε ως πρωτεύον στόχο να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των οχημάτων που απαιτούνται για την κάλυψη όλων των δρομολογίων με χρονοδιάγραμμα και δευτερεύον να ελαχιστοποιηθεί η συνολική απόσταση του ταξιδιού. Σε αυτή την μελέτη παρουσιάζεται ένα βελτιωμένο μοντέλο, ένα ακέραιο γραμμικό μοντέλο, το οποίο εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι ο χρόνος έναρξης κάθε ταξιδιού στο E-VSP (Electric Vehicle Service Provider) είναι σταθερός. Το μοντέλο δημιουργεί αντίγραφα για τους σταθμούς επαναφόρτισης και αναθέτει κάθε αντίγραφο σε ένα συγκεκριμένο ταξίδι. Έτσι, είναι δυνατόν να καθορίσει τα χρονικά παράθυρα σε κάθε αντίγραφο του σταθμού επαναφόρτισης, όπου μπορούν να εξασφαλίσουν ότι η δομή γραφήματος είναι κοντά σε ένα κατευθυνόμενο ακυκλικό γράφημα (DAG). Στη συνέχεια δημιουργείται ένα ευρετικό σύστημα Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) για την επίλυση του E-VSP. Η ALNS δοκιμάζεται σε πρόσφατα δημιουργημένες περιπτώσεις αναφοράς E-VSP. Στο ALNS, υιοθετείται ένα ευρύ φάσμα μεθόδων επιδιόρθωσης και καταστροφής, εφαρμόζεται περιστασιακά μια φάση διαφοροποίησης και εφαρμόζεται μια φάση μεταβελτιστοποίησης για την περαιτέρω βελτίωση της λύσης. Το αποτέλεσμα δείχνει ότι η προτεινομένη ευρετική μέθοδος μπορεί να παρέχει καλές λύσεις σε μεγάλες περιπτώσεις E-VSP και βέλτιστες λύσεις σε μικρές περιπτώσεις E-VSP.

Μια ακόμη μελέτη είναι από τους Chunlu Wang et al.(2021), οι οποίοι μελέτησαν το πρόβλημα προγραμματισμού ηλεκτρικών οχημάτων πολλαπλών σταθμών (MD-EVSP), σε δημοσιά μέσα μεταφοράς και προτείνουν μια προσέγγιση δημιουργίας στηλών βασισμένη σε γενετικό αλγόριθμο (GA-CG) για το MD-EVSP. Το MD-EVSP περιλαμβάνει πολλαπλές αποθήκες και γραμμές λεωφορείων. Κάθε αμαξοστάσιο έχει περιορισμένο αριθμό οχημάτων και σημείων φόρτισης. Έτσι, ένα όχημα πρέπει να φτάσει σε έναν σταθμό φόρτισης για να φορτιστεί πριν η απόσταση διαδρομής του υπερβεί τη μέγιστη εμβέλεια της μπαταρίας. Το MD-EVSP συνίσταται στον προγραμματισμό όλων των οχημάτων από πολλές αποθήκες, ώστε οι διαδρομές αυτών των οχημάτων να καλύπτουν όλα τα χρονικά σημεία των δρομολογίων αναχώρησης, όλων των λεωφορειακών γραμμών, ώστε να διασφαλίζεται παράλληλα ότι κάθε χρονικό σημείο των δρομολογίων καλύπτεται από ακριβώς μια διαδρομή. Η ερευνά δημιουργεί ένα ακέραιο γραμμικό μοντέλο για την επίλυση του προβλήματος. Αρχικά, επινοείται μια ευρετική μέθοδος για τη δημιουργία ενός συνόλου αρχικών στηλών. Στη συνέχεια, ξεκινώντας από τις αρχικές στήλες, χρησιμοποιείται η προσέγγιση δημιουργίας στηλών με έναν αλγόριθμο διόρθωσης ετικετών για τη δημιουργία ενός συνόλου υποψήφιων στηλών. Τέλος, δημιουργείται ένας γενετικός αλγόριθμος για την επιλογή ενός υποσυνόλου στηλών από το σύνολο τους για την κατασκευή της τελικής λύσης. Σχεδιάζεται ένα σχήμα κωδικοποίησης των λύσεων για την αναπαράσταση ενός υποσυνόλου στηλών, δηλαδή μιας υποψήφιας λύσης του MD-EVSP. Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται σε ένα πραγματικό πρόβλημα με τρεις γραμμές λεωφορείων στο Qingdao

της Κίνας. Τα πειράματα δείχνουν ότι μπορεί να λύσει αποτελεσματικά το πρόβλημα και ο υπολογιστικός του χρόνος είναι περίπου 40 φορές μικρότερος.

Οι Mohammad Sadrani et al.(2023) επικεντρώθηκαν στη βελτιστοποίηση του προγραμματισμού λεωφορείων μικτού στόλου στα μέσα μεταφοράς. Ανέπτυξαν ένα νέο μοντέλο μικτού-ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού που αντιμετωπίζει το πρόβλημα MFBS (mix-fleet bus scheduling - προγραμματισμός λεωφορείων μικτού στόλου) βελτιστοποιώντας τα προγράμματα ανάθεσης και αποστολής οχημάτων. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη το κόστος των χρηστών και το κόστος του φορέα εκμετάλλευσης, καθώς και την ταλαιπωρία των χρηστών από τον συνωστισμό. Στη παρούσα μελέτη ανέπτυξαν δυο υβριδικούς μεταερευτικούς αλγορίθμους, τους Γενετικά αλγόριθμους σε συνδυασμό με Προσομοιωμένη Ανόπτηση (GA-SA) με προσέγγιση Taguchi για τη βαθμονόμηση των παραμέτρων των μεταερευτικών αλγορίθμων. Το μοντέλο εφαρμόστηκε σε ένα πραγματικό διάδρομο λεωφορείων στο Σαντιάγο της Χιλής, διαπιστώνοντας ότι οδηγούν σε εξοικονόμηση κόστους και βελτιωμένη απόδοση σε σύγκριση με τους απλούστερους αλγορίθμους. Τέλος, η ερευνά προάγει την κατανόηση και την δυνατότητα βελτιστοποίησης του προγραμματισμού λεωφορείων μικτού στόλου, συμβάλλοντας στην αποτελεσματική και άνετη λειτουργία των συστημάτων δημοσίων μεταφορών.

Μια από τις πολλές μελέτες πάνω στον επανασχεδιασμό των ηλεκτρικών λεωφορείων είναι των Aijia Zhang et al.(2021), η οποία είχε ως στόχο το πρόβλημα προγραμματισμού ηλεκτρικών οχημάτων πολλαπλών σταθμών και πολλαπλών τύπων οχημάτων με στρατηγική μερικής μικτής διαδρομής και μερικής επαναφόρτισης. Η στρατηγική μερικής μικτής διαδρομής επιτρέπει τη λειτουργία πολλαπλών δρομολογίων μεταφοράς με πιο αποδοτικό τρόπο. Επιπλέον, λαμβάνει υπόψη το πρόβλημα κατανομής των λεωφορείων του στόλου στο δίκτυο διαμετακόμισης για την ικανοποίηση των περιορισμών στάθμευσης σε κάθε αμαξοστάσιο. Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους απόκτησης του στόλου και του λειτουργικού κόστους του χρονοδιαγράμματος. Το πρόβλημα διατυπώνεται σε ένα μοντέλο μικτού ακέραιου προγραμματισμού και προτείνεται ένας αλγόριθμος προσαρμοστικής αναζήτησης μεγάλης γειτονίας (ALNS - είναι μια γενική, καλά τεκμηριωμένη και δοκιμασμένη υλοποίηση της μεθευρετικής αναζήτησης προσαρμοστικής μεγάλης γειτονίας σε Python) με νέους μηχανισμούς, ειδικά για το πρόβλημα του μοντέλου. Για τη παρούσα μελέτη χρησιμοποιείται το σύνολο δεδομένων ενός πραγματικού δικτύου στη Nanjing και η απόδοση του ALNS δοκιμάζεται με τη χρήση τυχαίων περιπτώσεων από το σύνολο δεδομένων. Στην αρχή, το πρόγραμμα υπολογίζει το κόστος αγοράς όλων των οχημάτων με βάση τον αριθμό που αναχωρούν από κάθε αποθήκη. Έπειτα, το κόστος κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας που εξυπηρετεί τα δρομολόγια με προορισμό και χωρίς, καθώς και το χρόνο κόστους στο πρόγραμμα, το οποίο είναι κυρίως ο μισθός των οδηγών και των υπολοίπων ατόμων. Οι μέθοδοι καταστροφής και επισκευής προσαρμόζονται με νέους μηχανισμούς για να χειριστούν την πολυπλοκότητα του προβλήματος, το οποίο λαμβάνει υπόψη πολλαπλές αποθήκες και πολλαπλούς τύπους οχημάτων. Άρα, ενσωματώνεται η διαδικασία τοπικής αναζήτησης για να βελτιωθεί περαιτέρω η ικανότητα αναζήτησης γειτονίας του αλγορίθμου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι σε σύγκριση με την πλήρους επαναφόρτιση, η μερική επαναφόρτιση μπορεί να μειώσει το μέγεθος του στόλου, το συνολικό κόστος και τη συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Η σύγκριση των δυο χρονοδιαγραμμάτων που χρησιμοποιούν διαφορετικές στρατηγικές μερικής μικτής διαδρομής δείχνει ότι μπορεί να υπάρχουν δυο πλευρές της υιοθέτησης χρονοδιαγράμματος μικτής διαδρομής. Επιπλέον, για να μελετηθεί η

επίδραση των διαφορετικών ελάχιστων αναλογιών επαναφόρτισης στα αποτελέσματα, απαιτείται από το λεωφορείο να επαναφορτίζει στο 30-100% της χωρητικότητας της μπαταρίας σε κάθε δραστηριότητα επαναφόρτισης. Καταλήγοντας, παρουσιάζεται ότι οι ευέλικτες δραστηριότητες επαναφόρτισης, συμπεριλαμβανομένης της υιοθέτησης της στρατηγικής «μια επαναφόρτιση, ένα ταξίδι» μπορούν να μειώσουν τόσο το μέγεθος του στόλου όσο και το λειτουργικό κόστος.

Πρόσφατα, οι K.Gkiotsalitis et al.(2023), παρουσίασαν μια μελέτη που επεκτείνει το πρόβλημα του χρονοπρογραμματισμού οχημάτων πολλαπλών σταθμών με χρονικά παράθυρα (MDVSPTW - multi-depot vehicle scheduling problem with time windows) στην περίπτωση των ηλεκτρικών οχημάτων, τα οποία μπορούν να φορτίζουν σε σταθμούς φόρτισης που βρίσκονται σε οποιοδήποτε σημείο της περιοχής. Στη παρούσα μελέτη παρουσιάζουν μια μεικτή-ακέραιη γραμμική διατύπωση για το EB-MDVSPTW υπό περιορισμούς των χρονικών παραθύρων και του προγραμματισμού των φορτιστών, λαμβάνοντας υπόψη τη δυνατότητα φόρτισης σε στάσεις λεωφορείων, τερματικούς σταθμούς και σταθμούς φόρτισης μικτής χρήσης. Η μελέτη λαμβάνει υπόψη την χωρητικότητα των σταθμών φόρτισης και απαγορεύει την ταυτόχρονη φόρτιση διαφορετικών οχημάτων στον ίδιο φορτιστή. Οι φορτιστές αναδιαμορφώνονται ως κόμβοι εργασιών ενός εκτεταμένου δικτύου και μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιαδήποτε θέση χρησιμοποιώντας την υποδοχή φόρτισης μιας πόλης αντί να χρησιμοποιούνται μόνο φορτιστές που προορίζονται για λεωφορεία. Στη συνέχεια, γραμμικοποιείται η διατύπωση του MINLP ως EB-MDVSPTW αναδιατυπώνοντας το σε ένα μεικτό ακέραιο γραμμικό πρόγραμμα που μπορεί να επιλυθεί, με στόχο τη συνολική βελτιστοποίηση. Το EB-MDVSPTW είναι ένα NP-Hard όπου εισάγουν επίσης έγκυρες ανισότητες για να περιορίσουν το χώρο αναζήτησης και να διερευνήσουν το συμβιβασμό μεταξύ της συμπίεσης και της στεγανότητας του προβλήματος έως και 30 ταξίδια. Τα αποτελέσματα είναι ότι μειώνεται η συμπαγής μορφή του προβλήματος, αυξάνοντας έως και τρεις φορές τον αριθμό των περιορισμών, αλλά ταυτόχρονα βελτιώνουν και τη στεγανότητα με αποτέλεσμα τη βελτίωση έως και 73% του υπολογιστικού χρόνου σε περιπτώσεις με 20 ταξίδια.

Στο ίδιο πλαίσιο κυμαίνεται και η ερευνά των Jing Teng et al.(2019), η οποία επικεντρώνεται στο πρόβλημα του προγραμματισμού των δρομολογίων και των οχημάτων με ηλεκτρικά λεωφορεία και αναπτύσσει ένα μοντέλο βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων για μια ενιαία γραμμή ηλεκτρικών λεωφορείων στην Σαγκάη, της Κίνας. Η παρούσα έρευνα περιλαμβάνει την εξομάλυνση των διαστημάτων αναχώρησης των λεωφορείων και την ελαχιστοποίηση του αριθμού των οχημάτων και του συνολικού κόστους φόρτισης. Οι περιορισμοί έχουν στόχο να ανάγουν το εύρος των διαστημάτων αναχώρησης κατά τη διάρκεια διαφορετικών χρονικών περιόδων, τη χιλιομετρική απόσταση λειτουργίας των οχημάτων και τις συνθήκες φόρτισης. Αναπτύσσεται ένας αλγόριθμος πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (MOPSO – multi-objective particle swarm optimization), όπου οι λύσεις προκύπτουν με την μέθοδο Pareto (Pareto-optimal solution set). Πιο αναλυτικά, δημιουργείται ένα πρόγραμμα όπου επικεντρώνεται στην ελαχιστοποίηση του αριθμού των οχημάτων και του συνολικού κόστους επαναφόρτισης. Εάν η εναπομένουσα εμβέλεια του οχήματος είναι μικρότερη από την οριακή εμβέλεια φόρτισης, τότε το όχημα πρέπει να επαναφορτιστεί. Το πρόγραμμα μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά τον αριθμό των οχημάτων και το συνολικό κόστος χρέωσης, καθώς και να αυξήσει την ομαλότητα των διαστημάτων αναχώρησης. Επιπλέον, οι περίοδοι φόρτισης των οχημάτων κατανέμονται καλύτερα κατά τις ώρες αιχμής της ηλεκτρικής ενέργειας

παράλληλα και η χιλιομετρική απόσταση των ταξιδιών και ο μέσος χρόνος φόρτισης των οχημάτων είναι υψηλότερα. Τέλος, η κατανάλωση ενέργειας ενός ηλεκτρικού λεωφορείου μπορεί να επηρεαστεί από το φορτίο επιβατών και το προφίλ οδήγησης.

Συμπερασματικά, είναι φανερό ότι τα τελευταία χρόνια ολοένα και περισσότερες μελέτες επικεντρώνουν το ενδιαφέρον τους στο χρονοπρογραμματισμό των ηλεκτρικών οχημάτων στα συστήματα δημόσιας αστικής συγκοινωνίας. Όλες οι μελέτες καταλήγουν στο γεγονός ότι τα ηλεκτρικά λεωφορεία, μπορούν να ανταποκριθούν αποτελεσματικά στις ανάγκες του συστήματος αναβαθμίζοντας την ποιότητα των υπηρεσιών, ελαχιστοποιώντας τους απαιτούμενους χρόνους φόρτισης, των ταξιδιών και τις αναμονές, καθώς και ελαχιστοποιώντας το κόστος. Στον συγκεντρωτικό πίνακα παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι κυριότερες μελέτες.

Πίνακας 1: Μαθηματικά μοντέλα

Έτος	Συγγραφέας	Τίτλος Μελέτης	Μεθοδολογία	Μέθοδος λύσης	Στόχος
2021	Liu Kai et al.	Βέλτιστη στρατηγική φόρτισης για ηλεκτρικά λεωφορεία μεγάλης κλίμακας λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς των πόρων	Μικτός αέριος γραμμικός προγραμματισμός	Ευρετική	Μείωση κόστους φόρτισης, βελτιστοποίηση του προγραμματισμού φόρτισης
2019	Xindi Tang et al.	Στιβαρές στρατηγικές προγραμματισμού ηλεκτρικών λεωφορείων υπό стоχαστικές συνθήκες κυκλοφορίας	Μικτός αέριος γραμμικός προγραμματισμός	Ακριβής	Μείωση κόστους καθυστέρησης, αποφυγή βλάβης των ηλεκτρικών λεωφορείων
2016	M.Wen et al.	Μια προσαρμοστική ευρετική αναζήτηση μεγάλης γειτονίας για το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού ηλεκτρικών οχημάτων	Μικτός αέριος γραμμικός προγραμματισμός	Ευρετική	Ελαχιστοποίηση του αριθμού των οχημάτων που απαιτούνται για την κάλυψη των δρομολογίων και της συνολικής απόστασης της διαδρομής
2021	Chunlu Wang et al.	Επίλυση του προβλήματος χρονοπρογραμματισμού ηλεκτρικών οχημάτων πολλαπλών σταθμών με παραγωγή στηλών και γενετικό αλγόριθμο	Αέριος γραμμικός προγραμματισμός	Ευρετική, γενετικός αλγόριθμος	Προγραμματισμός οχημάτων με πολλές αποθήκες, ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους: σταθερό κόστος, ταξιδιού και φόρτισης
2023	Mohammad Sadrani et al.	Προγραμματισμός λεωφορείων με ετερογενείς στόλους : αλγόριθμοι υπολογιστικής νοημοσύνης	Μικτός αέριος μη γραμμικός προγραμματισμός	Μεθευρετική	Βελτιστοποίηση του προγραμματισμού λεωφορείων με μικτό στόλο
2021	Aijia Zhang et al.	Πρόβλημα προγραμματισμού μικτού στόλου ηλεκτρικών λεωφορείων με μερική μικτή	Μικτός αέριος γραμμικός προγραμματισμός	Μεθευρετική, ακριβής	Ελαχιστοποίηση του κόστους απόκτησης στόλου και του λειτουργικού κόστους του χρονοδιαγράμματος

		διαδρομή και μερική επαναφόρτιση			
2023	K.Gkiotsalitis et al.	Μια ακριβής προσέγγιση για το πρόβλημα προγραμματισμού ηλεκτρικών λεωφορείων πολλαπλών σταθμών με χρονικά παράθυρα	Μικτός ακέραιος μη γραμμικός προγραμματισμός	Ακριβής	Βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού οχημάτων με πολλαπλούς σταθμούς
2019	Jing Teng et al.	Ολοκληρωμένη προσέγγιση για τον προγραμματισμό οχημάτων και το χρονοδιάγραμμα λεωφορείων για μια γραμμή ηλεκτρικών λεωφορείων	Ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός	Αλγόριθμος βελτιστοποίησης	Ελαχιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού για τον αριθμό των οχημάτων και το συνολικό κόστος

Πίνακας 2: Κατηγορίες κριτηρίων που χρησιμοποιήθηκαν σε προηγούμενα μοντέλα

Παραπομπή	Κατανάλωση ενέργειας	Χρονικά παράθυρα	Χρόνος φόρτισης	Κόστος αναμονής	Χρονοπρογραμματισμός	Χωρητικότητα μπαταρία
Liu Kai et al.(2021)	√		√			
Xindi Tang et al.(2019)	√		√		√	
M.Wen et al.(2016)		√	√			√
Chunlu Wang et al.(2021)	√		√	√	√	
Mohammad Sadrani et al.(2023)				√	√	
Aijia Zhang et al.(2021)	√		√			√
K.Gkiotsalitis et al.(2023)	√	√	√		√	
Jing Teng et al.(2019)		√	√	√		

3. ΜΕΘΟΛΟΓΙΑ

Στη παρούσα διπλωματική θα αναλυθεί το ζήτημα χρονοπρογραμματισμού φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων. Πιο συγκεκριμένα, θα γίνει χρήση του μοντέλου των Jing Teng, Tong Chen & Wei David Fan (2019), καθώς βάσει αυτής της εργασίας, καταστρώθηκε ένα εκτεταμένο μοντέλο, το οποίο παρουσιάζεται στην συνέχεια του κεφαλαίου.

Αναλυτικότερα, οι Jing Teng, Tong Chen & Wei David Fan (2019) ανέπτυξαν ένα αλγόριθμο πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης (MOPSO – multi-objective particle swarm optimization), όπου οι λύσεις προκύπτουν με την μέθοδο Pareto (Pareto-optimal solution set). Με αυτό τον τρόπο δημιούργησαν ένα ακέραιο γραμμικό μοντέλο για να βελτιστοποιήσουν τον προγραμματισμό των ηλεκτρικών λεωφορείων, όπως παρουσιάζεται και παρακάτω.

Για την κατάστροψη του μοντέλου τους έλαβαν υπόψη τις συνθήκες φόρτισης, οι οποίες σχετίζονται με την κατάσταση της στάθμης της μπαταρίας του οχήματος και την αποθήκευση ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής. Επιπλέον, λήφθηκε υπόψη το κόστος φόρτισης που σχετίζεται με τη διάρκεια του χρόνου φόρτισης και τη χρονική περίοδο της, ενώ για να απλοποιηθεί το πρόβλημα, έκαναν τις ακόλουθες υποθέσεις:

1. Τα ηλεκτρικά λεωφορεία δεν μπορούν να επαναφορτιστούν έως ότου ολοκληρώσουν μια ή αρκετές διαδρομές πριν από την άφιξη στο αμαξοστάσιο.
2. Εάν η εμβέλεια της μπαταρίας δεν επαρκεί για την ολοκλήρωση της διαδρομής και της επιστροφής στο αμαξοστάσιο τότε το όχημα πρέπει να φορτιστεί και ονομάζεται οριακό εύρος φόρτισης.
3. Εάν η υπόλοιπη αυτονομία του οχήματος είναι μεγαλύτερη από το όριο φόρτισης, τότε το όχημα μπορεί επίσης να φορτιστεί. Ο χρόνος επαναφόρτισης σχετίζεται μόνο με την απόσταση που διανοίχθηκε.
4. Η επαναφόρτιση της μπαταρίας ξεκινάει μόλις το όχημα φτάσει στο σημείο προκειμένου να διασφαλιστεί η αποδοτικότητα του κύκλου εργασιών του οχήματος.
5. Για την πραγματική λειτουργία των ηλεκτρικών λεωφορείων στην Κίνα δεν είναι επαρκώς εξοπλισμένοι και οι περισσότεροι είναι εγκατεστημένοι στο αμαξοστάσιο. Οι αποστάσεις μεταξύ του αμαξοστασίου και των γραμμών λεωφορείων είναι πολύ μεγάλες, έτσι πρέπει να φορτιστούν πλήρως πριν από την επόμενη διαδρομή.
6. Ο χρόνος φόρτισης θα πρέπει να αποφεύγετε τις ώρες αιχμής της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς δεν επιτρέπεται από την κυβερνητική πολιτική.

Βάση του μοντέλου των Jing Teng, Tong Chen & Wei David Fan (2019) και όσων προαναφέρθηκαν θα καταστρωθεί μια μορφή εκτεταμένου μοντέλου, που έχει ως στόχο την βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων.

Ωστόσο, ανάμεσα στα δυο μοντέλα, σημειώνεται οι εξής διαφοροποιήσεις :

1. Αρχικά, δίνεται έμφαση στον αριθμό των οχημάτων που θα χρησιμοποιηθούν σε μια δεδομένη γραμμή δρομολογίων.
2. Η παράμετρος του κόστους δεν περιλαμβάνεται στην αντικειμενική συνάρτηση αλλά χρησιμοποιείται ως περιορισμός.

3. Τέλος, στη σύνθεση του μοντέλου προστέθηκαν νέες παράμετροι, όπως ο προϋπολογισμός του φορέα εκμετάλλευσης, η ελάχιστη κατάσταση φόρτισης, ο χρόνος ξεκινήματος του ταξιδιού i και j , καθώς και ο χρόνος διαδρομής i .

Για τη σαφέστερη διατύπωση του προβλήματος αρχικά παρατίθενται τα μαθηματικά σύνολα και αναλύονται οι παράμετροι των στοιχείων του μοντέλου.

Ειδικότερα τα σύνολα, οι παράμετροι και οι μεταβλητές του προβλήματος διατυπώνονται ως εξής:

Πίνακας 3: Συμβολισμοί

<i>Σύνολα</i>	
K	Σύνολο οχημάτων
S	Σύνολο σταθμών φόρτισης
V	Σύνολο ταξιδιών
Vo	Σύνολο ταξιδιών που μπορούν να πραγματοποιηθούν με όχημα k
<i>Παράμετροι</i>	
p	Ηλεκτρικό κόστος την ώρα (ευρώ/kwh)
SOC_{max}	Χωρητικότητα μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων (kwh)
r	Ταχύτητα φόρτισης (%)
β	Προϋπολογισμός του φορέα εκμετάλλευσης (ευρώ)
L	Κατανάλωση ενέργειας από το αμαξοστάσιο στην αφετηρία (km)
SOC_{min}	Ελάχιστη κατάσταση φόρτισης (%)
τ_i	Χρόνος ξεκινήματος του ταξιδιού i (min)
Φ_i	Κατανάλωση ενέργειας κατά την εκτέλεση του ταξιδιού i (kwh)
T	Χρόνος οδήγησης έως το αμαξοστάσιο για φόρτιση (min)
τ_j	Χρόνος ξεκινήματος του ταξιδιού j (min)
ω_i	Χρόνος διαδρομής (min)
M	Αρκετά μεγάλος θετικός αριθμός
<i>Μεταβλητές</i>	
Y_k	0 ή 1 . Εάν το ηλεκτρικό όχημα εκτελεί ή όχι ταξίδι.
X_{kij}	0 ή 1. Εάν το ταξίδι j εκτελείται μετά το ταξίδι i από το ίδιο ηλεκτρικό όχημα k , τότε $X_{kij} = 1$. Διαφορετικά, $X_{kij} = 0$
t_{kij}	Χρόνος φόρτισης του οχήματος k όταν εκτελεί το ταξίδι j μετά το ταξίδι i (min)
SOC_{ki}	Κατάσταση φόρτισης του οχήματος k

	αφού εκτελεστεί το ταξίδι i (min)
SOC_{kii}	Ενέργεια που υπάρχει στην τοποθεσία
$bkij$	0 ή 1. Εάν το όχημα k έχει αλλάξει μεταξύ των ταξιδιών i και j
YY_k	Μέγιστος αριθμός οχημάτων αφού ολοκληρωθεί το ταξίδι i
δk	0 ή 1. Εάν το ηλεκτρικό όχημα k εκτελεί κάποιο ταξίδι

Κύριος στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του στόλου των ηλεκτρικών λεωφορείων που θα χρησιμοποιηθούν για τη διεξαγωγή δρομολογίων σε μια δεδομένη γραμμή. Με αυτό τον τρόπο, δίνεται έμφαση στην ελαχιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Η μαθηματική διατύπωση βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές :

1. Δεν υπάρχουν πολλά σημεία φόρτισης αλλά μόνο ένα στην αποθήκη των λεωφορείων (αμαξοστάσιο).
2. Οι οδηγοί λεωφορείων πρέπει να φορτίζουν τα οχήματα τους αφού πραγματοποιήσουν ένα ταξίδι i και η κατάσταση φόρτισης (SoC) δεν τους επιτρέπει να πραγματοποιήσουν ένα νέο ταξίδι.
3. Ένα όχημα δεν μπορεί να πραγματοποιήσει ένα νέο ταξίδι, εάν δεν είναι στην ώρα του.

Με δεδομένο ότι, τα σημεία φόρτισης των λεωφορείων τοποθετούνται συχνά στην αφετηρία ή στον τερματικό, θεωρείται ότι η διαδικασία της φόρτισης πραγματοποιείται, μετά την ολοκλήρωση του εκάστοτε δρομολογίου.

Όπως αναφέρθηκε λοιπόν, στόχος της βελτιστοποίησης του χρονοπρογραμματισμού των οχημάτων είναι η ελαχιστοποίηση του αριθμού των οχημάτων και διατυπώνεται μαθηματικά ως εξής :

$$\min Z = \sum_{k=1}^m Y_k \quad \forall k \in m \quad (1)$$

Οι περιορισμοί είναι :

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n X_{kij} = 1 \quad i \neq j, \forall j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n X_{kij} = 1 \quad i \neq j, \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n X_{k0i} = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n X_{k0j} \quad \forall i \in V, j \in V, k \in K \quad (4)$$

$$Y_k = 1 - YY_k \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$YY_k \geq 1 - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{kij} \quad \forall i \in V, j \in V, k \in K \quad (6)$$

$$YY_k \geq 0 \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$YY_k \leq \{1 - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{kij} + \delta_k * M\} \quad \forall i \in V, j \in V, k \in K \quad (8)$$

$$YY_k \leq (1 - \delta_k * M) \quad \forall k \in K \quad (9)$$

$$SOC_{kij} + \Phi_i \geq SOC_{min} \quad \forall i \in V, j \in V, k \in K \quad (10)$$

$$X_{kij} * \tau_j \geq (\tau_i + \omega_i + t_{kij} + 2T)X_{kij} \quad \forall i \in V, j \in V, k \in K \quad (11)$$

$$t_{kij} = X_{kij}(SOC_{max} - SOC_{ki})/r \quad \forall i \in V, j \in V, k \in K \quad (12)$$

$$SOC_{kij} = (SOC_{ki} - \Phi_i)(1 - b_{kij}) + (SOC_{max} - L)b_{kij} \quad \forall i \in V, j \in V, k \in K \quad (13)$$

$$\sum_{k \in K} b_{kij} \leq 1 \quad \forall i \in V, j \in V \quad (14)$$

$$b_{kij} \leq X_{kij} \quad \forall i \in V, j \in V, k \in K \quad (15)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} b_{kij} * t_{kij} * r * p \leq \beta \quad (16)$$

Οι περιορισμοί (2) και (3) δίνονται για να εκφράσουν την αλληλουχία των δρομολογίων, πρώτα πραγματοποιείται το ταξίδι i και μετά το ταξίδι j . Ο περιορισμός (4) δίνει την διασφάλιση της λειτουργικότητας των διάδρομων, καθώς και την ισορροπία της ροής στην αποθήκη. Εάν το $X_{koi} = 1$, τότε το όχημα k φεύγει από την αποθήκη και ξεκινάει το ταξίδι i . Εάν το $X_{kjo} = 1$, τότε το όχημα k εκτελεί τη διαδρομή j και στη συνέχεια επιστρέφει στην αποθήκη. Ο περιορισμός της εξίσωσης (5) δηλώνει ότι εάν το όχημα πραγματοποιήσει τουλάχιστον ένα ταξίδι, τότε έχουμε $Y_k = 1$. Η εξίσωση (6) εκφράζει τον μέγιστο αριθμό που μπορεί να πάρει ώστε το όχημα k να είναι σε χρήση, εάν το k εγκαταλείπει το αμαξοστάσιο τουλάχιστον μια φορά. Με την (7) διασφαλίζεται ότι κάθε όχημα $k \in K$ είναι σε λειτουργία και δεν μπορεί να παρέχει αρνητική τιμή. Η εξίσωση (8) δηλώνει ότι όταν ένα όχημα k είναι σε χρήση, τότε εκτελεί κάποιο ταξίδι. Ο περιορισμός (9) εκφράζει ότι ο μέγιστος αριθμός των οχημάτων πρέπει να είναι μικρότερος ή ίσος με τον διαθέσιμο αριθμό των οχημάτων k που μπορούν να εκτελέσουν το ταξίδι. Η εξίσωση (10) δηλώνει ότι ένα όχημα k δε μπορεί να κάνει το ταξίδι j μετά το ταξίδι i , εάν δεν έχει την απαραίτητη ενέργεια. Ο περιορισμός στο (11) μας αναφέρει ότι ένα όχημα k δε μπορεί να κάνει το ταξίδι j μετά το ταξίδι i , εάν ο χρόνος άφιξης του στο j είναι μεγαλύτερο του τ_j . Ο περιορισμός στην εξίσωση (12) εκφράζει την συνάρτηση που αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό του χρόνου φόρτισης του οχήματος k όταν εκτελεί το ταξίδι j μετά το ταξίδι i . Η εξίσωση (13) δηλώνει την ενέργεια που έχουμε στην τοποθεσία. Εάν το $b_{kij} = 1$, τότε το όχημα k έχει αλλάξει μεταξύ των ταξιδιών i και j , αλλιώς το $b_{kij} = 0$. Ο περιορισμός (14) παρουσιάζει εάν ένα όχημα k αφού εκτελέσει το ταξίδι i θα χρειαστεί να φορτίσει ή όχι. Η εξίσωση (15) δηλώνει ότι δυο διαδοχικά δρομολόγια μπορούν να εκτελεστούν από μόνο ένα όχημα. Τέλος, ο περιορισμός (16) αντιπροσωπεύει το συνολικό κόστος

φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων που δεν είναι μεγαλύτερος από τον δεδομένο προϋπολογισμό του φορέα.

Το μαθηματικό μοντέλου που προκύπτει αποτελεί πρόβλημα γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

4.1. Εισαγωγή

Σε αυτή την ενότητα γίνεται μια παρουσίαση δεδομένων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για υπολογιστικά πειράματα. Με τον τρόπο αυτό, θα αξιολογηθεί η αξιοπιστία και η αποτελεσματικότητα του νέου μοντέλου. Στη συνέχεια, έγινε ανάλυση ευαισθησίας στο μοντέλο, όπου με τη μεταβολή διάφορων παραμέτρων, αξιολογήθηκε η σημαντικότητα τους, στην διαμόρφωση της επίλυσης και των αποτελεσμάτων. Το μοντέλο παραγραμματίστηκε σε Python 3.9 (64-bit), ενώ έγινε χρήση υπολογιστή με επεξεργαστή 1,1 GHz Διπύρηνος επεξεργαστής Intel Core i3 και μνήμη RAM 8 GB. Ο solver που χρησιμοποιήθηκε είναι ο GUROBI 11.00.

4.2. Αριθμητικά πειράματα

Το αριθμητικό παράδειγμα που αναλύεται σε αυτή την ενότητα, αφορά ένα δίκτυο μεταφοράς, το οποίο αποτελείται από ηλεκτρικά λεωφορεία και χρησιμοποιεί μια ενιαία γραμμή διαμετακόμισης. Για την αξιολόγηση του προτεινομένου μοντέλου, δημιουργήθηκαν σενάρια προβλημάτων τα οποία κάθε φορά διαφοροποιούνταν ως προς τον αριθμό οχημάτων, τον αριθμό σταθμών φόρτισης και τον αριθμό των ταξιδιών.

Πιο συγκεκριμένα, για την αξιολόγηση του μοντέλου, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση τριών βασικών σεναρίων μεταβάλλοντας, την παράμετρο του προϋπολογισμού και του χρόνου διαδρομής. Εξετάζεται κάθε φορά ένας διαφορετικός στόλος, ο οποίος έχει σταθερή χωρητικότητα μπαταρίας (SoC_{max}) και ταχύτητα της φόρτισης (r). Το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας (p), η κατανάλωση ενέργειας από το αμαξοστάσιο στην αφετηρία (L), η κατανάλωση της ενέργειας κατά την εκτέλεση του ταξιδιού i (Φ), ο χρόνος ξεκινήματος του ταξιδιού i (τ_i) και ο χρόνος οδήγησης που εκτελεί ο οδηγός του λεωφορείου έως το αμαξοστάσιο για να φορτίσει (T) παραμένουν σταθερά. Τέλος, για όλες τις περιπτώσεις του προβλήματος λαμβάνεται υπόψη μια κοινή τιμή για την ελάχιστη κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (SoC_{min}) που χρειάζεται ένα όχημα ώστε να πραγματοποιήσει ένα καινούριο ταξίδι.

Στο πίνακα 4 παρουσιάζονται τα δεδομένα και τα αποτελέσματα των σεναρίων, με σκοπό την αξιολόγηση του προτεινόμενου μοντέλου. Πιο αναλυτικά, έγινε η καταγραφή των βέλτιστων λύσεων, ανά σενάριο, (bst), των αποκλίσεων gap (%) και του χρόνου σε δευτερόλεπτα (sec), που απαιτείται για την επίτευξη της βέλτιστης λύσης, για κάθε περίπτωση προβλήματος.

Όπως φαίνεται στον πίνακα 4, για διαφορετικές τιμές σεναρίων, το μοντέλο μπορεί να υπολογίσει βέλτιστη λύση.

Ωστόσο, από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι όσο αυξάνεται ο προϋπολογισμός ενώ ο χρόνος διαδρομής μένει σταθερός, τότε δεν παρατηρείται μεγάλη μεταβολή στον αριθμό των οχημάτων που επιλέγονται κατά μέσο όρο.

Πίνακας 4:Υπολογιστικά αποτελέσματα για τις παραγόμενες περιπτώσεις προβλημάτων

Σενάριο	bst	gap(%)	Χρόνος(sec)
K_5_S_3_V_10			
$\beta=5000$	$\omega_i=50$		
	4	0.0000%	0.36 sec
$\beta=10000$	$\omega_i=50$		
	1	0.0000%	0.33 sec
$\beta=100000$	$\omega_i=50$		
	1	0.0000%	0.28 sec
$\beta=10000$	$\omega_i=10$		
	1	0.0000%	0.28 sec
$\beta=10000$	$\omega_i=50$		
	1	0.0000%	0.28 sec
$\beta=10000$	$\omega_i=90$		
	1	0.0000%	0.31 sec
K_19_S_13_V_23			
$\beta=100000$	$\omega_i=100$		
	19	0.0000%	13.51 sec
$\beta=190000$	$\omega_i=100$		
	1	0.0000%	13.57 sec
$\beta=500000$	$\omega_i=100$		
	19	0.0000%	13.94 sec
$\beta=190000$	$\omega_i=30$		
	19	0.0000%	13.66 sec
$\beta=190000$	$\omega_i=100$		
	19	0.0000%	13.66 sec
$\beta=190000$	$\omega_i=300$		
	2	0.0000%	9.96 sec
K_60_S_30_V_100			
$\beta=10000$	$\omega_i=30$		
	60	0.0000%	2846.85 sec
$\beta=50000$	$\omega_i=30$		
	60	0.0000%	2275.33 sec
$\beta=100000$	$\omega_i=30$		
	60	0.0000%	2189.29 sec
$\beta=50000$	$\omega_i=10$		
	60	0.0000%	2396.88 sec
$\beta=50000$	$\omega_i=30$		
	60	0.0000%	2275.33 sec
$\beta=50000$	$\omega_i=50$		
	60	0.0000%	2312.07 sec

Η ίδια παρατήρηση ισχύει και για τις άλλες δυο περιπτώσεις. Όταν οι χρόνοι διαδρομής αυξηθούν αρκετά και ο προϋπολογισμός είναι σταθερός, παρατηρούμε ότι υπάρχει μείωση του αριθμού των χρησιμοποιούμενων ηλεκτρικών λεωφορείων και οι χρόνοι επίλυσης του προβλήματος αυξάνονται σημαντικά. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τις περιπτώσεις προβλημάτων μεγαλύτερης κλίμακας, ο χρόνος που απαιτείται για την εύρεση της βέλτιστης λύσης είναι σημαντικά μεγαλύτερος.

Πίνακας 5: Υπολογιστικά αποτελέσματα σεναρίων (a,b,c,d)

Σενάριο	bst	gap(%)	Χρόνος(sec)
β 10000 ω i 60			
a	10	0.0000%	12.99 sec
b	30	0.0000%	166.64 sec
c	42	0.0000%	361.07 sec
d	1	0.0000%	703.16 sec
β 500000 ω i 60			
a	1	0.0000%	10.25 sec
b	30	0.0000%	171.07 sec
c	42	0.0000%	342.12 sec
d	1	0.0000%	680.52 sec
β 1000000 ω i 60			
a	1	0.0000%	10.78 sec
b	30	0.0000%	1081.51 sec
c	42	0.0000%	341.88 sec
d	1	0.0000%	722.74 sec
β 500000 ω i 30			
a	1	0.0000%	9.48 sec
b	30	0.0000%	191.31 sec
c	42	0.0000%	345.50 sec
d	50	0.0000%	846.80 sec
β 500000 ω i 60			
a	1	0.0000%	10.25 sec
b	30	0.0000%	171.07 sec
c	42	0.0000%	342.12 sec
d	1	0.0000%	680.52 sec
β 500000 ω i 90			
a	1	0.0000%	10.01 sec
b	30	0.0000%	171.03 sec
c	42	0.0000%	406.19 sec
d	50	0.0000%	940.93 sec

Προκύπτει ότι μπορούν να ελαχιστοποιηθούν σημαντικά τα οχήματα που εν τέλει θα χρησιμοποιηθούν, καθώς και το συνολικό κόστος φόρτισης, ενώ βελτιώνεται και η συνοχή των χρονικών διαστημάτων αναχώρησης για τη διεξαγωγή του επόμενου δρομολογίου. Επιπλέον, γίνεται αντιληπτό ότι όσο αυξάνεται ο προϋπολογισμός υπάρχει σημαντική αύξηση στους χρόνους επίλυσης και εύρεσης αποτελέσματος της βέλτιστης λύσης, λόγω μεγαλύτερων αριθμητικών δεδομένων.

4.3. Ανάλυση ευαισθησίας

Προκειμένου να αξιολογηθούν οι σημαντικές παράμετροι του μοντέλου πραγματοποιήθηκαν περαιτέρω υπολογιστικά πειράματα λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές τιμές για τον διαθέσιμο προϋπολογισμό του φορέα εκμετάλλευσης (β) και τον χρόνο διαδρομής (ω_i). Πιο συγκεκριμένα εξετάζονται τρία επίπεδα τιμών (χαμηλό, μεσαίο και υψηλό) για κάθε μια από τις τρεις εξεταζόμενες παραμέτρους του μοντέλου. Οι τιμές κάθε παραμέτρου σε κάθε επίπεδο αναφέρονται στο πίνακα 6. Έγινε προσπάθεια να βρεθούν οι καλύτερες δυνατές λύσεις των παραμέτρων, όπου κάθε σενάριο μπορεί να επιλυθεί (εφικτότητα).

Πίνακας 6: Τιμές παραμέτρων

Σενάριο	β	ω_i
K 5 S 3 V 10		
	5000	10
	10000	50
	100000	90
K 10 S 5 V 30		
	100000	30
	500000	60
	1000000	90
K 19 S 13 V 23		
	100000	30
	190000	100
	500000	300
K_30_S_20_V_50		
	100000	30
	500000	60
	1000000	90
K 42 S 26 V 57		
	100000	30
	500000	60
	1000000	90
K_50_S_27_V_80		
	100000	30
	500000	60
	1000000	90
K 60 S 30 V 100		
	10000	10
	50000	30
	100000	50

Στο πίνακα 7 παρουσιάζονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικά επίπεδα του διαθέσιμου προϋπολογισμού β .

Πίνακας 7:Ανάλυση ευαισθησίας του προϋπολογισμού

Σενάριο	β (χαμηλό)	β (μεσαίο)	β (υψηλό)
	bst	bst	bst
K_5_S_3_V_10	4	1	1
K_10_S_5_V_30	10	1	1
K_19_S_13_V_23	19	19	1
K_30_S_20_V_50	30	30	30
K_42_S_26_V_57	42	42	42
K_50_S_27_V_80	1	1	1
K_60_S_30_V_100	60	60	60

Παρατηρούμε ότι τροποποιώντας τον προϋπολογισμό του φορέα εκμετάλλευσής, η τιμή της βέλτιστης λύσης, που είναι ο αριθμός των ηλεκτρικών λεωφορείων, μειώνεται. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό, διότι με την αύξηση του προϋπολογισμού και τον σταθερό χρόνο διαδρομής του ταξιδιού, δεν είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν περισσότερα οχήματα. Σε σενάρια με μεγαλύτερο αριθμό διαθέσιμων οχημάτων, ταξιδιών και σταθμών φόρτισης, δεν καταγράφονται σημαντικές μεταβολές στη βέλτιστη λύση, μεταβάλλοντας την παράμετρο του προϋπολογισμού (β).

Στον πίνακα 8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων μεταβάλλοντας την παράμετρο του χρόνου διαδρομής ω_i .

Πίνακας 8:Ανάλυση ευαισθησίας του χρόνου διαδρομής

Σενάριο	ω_i (χαμηλό)	ω_i (μεσαίο)	ω_i (υψηλό)
	bst	bst	bst
K_5_S_3_V_10	1	1	1
K_10_S_5_V_30	1	1	1
K_19_S_13_V_23	19	19	2
K_30_S_20_V_50	30	30	30
K_42_S_26_V_57	42	42	42
K_50_S_27_V_80	50	1	50
K_60_S_30_V_100	60	60	60

Παρατηρούμε ότι με την μεταβολή του χρόνου διαδρομής, η τιμή της καλύτερης αντικειμενικής λύσης, μειώνεται καθώς ο προϋπολογισμός είναι σταθερός. Όσο μεγαλώνει ο χρόνος διαδρομής τόσο πιο λίγα οχήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Ωστόσο, όπως απεικονίζεται στον παραπάνω πίνακα, τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την κατάστροψη και την επίλυση ενός μοντέλου βελτιστοποίησης, το οποίο αφορά τον χρονοπρογραμματισμό φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων και στόχος είναι να βελτιώσει τους νεκρούς χρόνους, καθώς και τον αριθμό των οχημάτων. Εφόσον μελετήθηκαν και καταγράφηκαν τα σημαντικότερα σημεία της βιβλιογραφίας, τα οποία πραγματεύονται το εν λόγω πρόβλημα, σχηματίστηκαν συνοπτικοί πίνακες, ώστε να γίνει εντοπισμός των κενών της βιβλιογραφίας.

Στο πλαίσιο βελτιστοποίησης του χρονοπρογραμματισμού φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων και την καλύτερη ένταξη τους στον τομέα των δημοσίων συγκοινωνιών, δημιουργήθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο, το οποίο επιλύθηκε με τη χρήση του solver GUROBI. Έγινε κατάστροψη ενός εκτεταμένου μοντέλου, το οποίο βασίστηκε στο μοντέλο των Jing Teng, Tong Chen & Wei David Fan (2019). Με την πιλοτική επίλυση μικρών δεδομένων, προέκυψε ότι το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να υπολογίσει βέλτιστη λύση.

Ωστόσο, για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του, εφαρμόστηκαν κάποια πειράματα, για διαφορετικές περιπτώσεις σεναρίων. Παρατηρήθηκε, ότι το μοντέλο μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά τον αριθμό των ηλεκτρικών λεωφορείων και το συνολικό κόστος του φορέα εκμετάλλευσής.

Πιο συγκεκριμένα, για να καταγραφεί η συμπεριφορά του μοντέλου πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας με σκοπό να εντοπισθεί η σημαντικότητα κάποιων παραμέτρων και η συμβολή τους στο τελικό αποτέλεσμα. Η ανάλυση ευαισθησίας εξετάζει τον αντίκτυπο του διαθέσιμου προϋπολογισμού και του χρόνου διαδρομής του ταξιδιού i . Στις δοκιμές που περιλαμβάνουν μεταβολές στις τιμές του προϋπολογισμού, παρατηρήθηκε ότι η συγκεκριμένη παράμετρος δεν επηρεάζει σημαντικά τη βέλτιστη λύση σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις προβλημάτων. Όμοια και με την μεταβολή του χρόνου διαδρομής i παρατηρείται αμελητέες διαφοροποίησης στη βέλτιστη λύση.

Η συμβολή μας στην παρούσα διπλωματική αποτελεί ένα πρώτο βήμα προς την ερευνά αναφορικά με τον στρατηγικό σχεδιασμό και ένταξη του ηλεκτρικού στόλου λεωφορείων, καθώς και την βελτιστοποίηση των νέκρων χρόνων αναμονής. Υπό συνθήκες δικτυακής λειτουργίας, τα πλεονεκτήματα της λογικής ρύθμισης για τη φόρτιση των ηλεκτρικών λεωφορείων αναμένεται να είναι πιο εμφανή.

Αυτό σημαίνει ότι αν μεγαλώσει το πρόβλημα, όσον αφορά τον στόλο των ηλεκτρικών οχημάτων, σε μεγαλύτερο δίκτυο, αν θα μπορεί να επιλυθεί επιτυχώς σε εύλογο χρονικό διάστημα το πρόβλημα μέσω προγράμματος.

Τέλος, για μελλοντική ερευνά προτείνεται η κατάστροψη μοντέλου το οποίο θα λαμβάνει υπόψη διάφορους εξωγενείς παράγοντες, όπως το γεγονός ότι η κατανάλωση ενέργειας και ο χρόνος ταξιδιού του ηλεκτρικού λεωφορείου θα κυμαίνεται υπό την επίδραση διάφορων παραγόντων, όπως οι συνθήκες κυκλοφορίας και οι καιρικές συνθήκες, που θα επηρεάσουν περαιτέρω την εφαρμογή της στρατηγικής φόρτισης. Ως εκ τούτου, η εξέταση των αβέβαιων παραγόντων στη διαδικασία λειτουργίας των ηλεκτρικών λεωφορείων για τη βελτίωση της ευρωστίας των στρατηγικών φόρτισης αποτελεί πρόκληση για τον επιστημονικό κόσμο, ενώ χρήσιμο θα ήταν να εξεταστούν

συνιστώσες, όπως οι χρόνοι εξυπηρέτησης σε μεγαλύτερης κλίμακας αριθμητικά δεδομένα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- EvConnect. (2023, February 14). What is Electric Vehicle Supply Equipment? 1.
- Aijia Zhang, T. L. (2021). Mixed electric bus fleet scheduling problem with partial mixed-route and partial recharging. *International Journal of Sustainable Transportation*, 16(1), 73-83.
- AIMMS Documentation. (2021). AIMMS. Ανάκτηση July 03, 2023
- Chunlu Wang, C. G. (2021). Solving multi-depot electric vehicle scheduling problem by column generation and genetic algorithm. *ELSERIER : Applied Soft Computing*, 112.
- Erdélyi, F. (2023, March 15). Electric Vehicles. *European Environment Agency*, σ. 1.
- European Automobile Manufacture's Association. (2023, March 21). Passenger car registrations:+11,5%in February ,battery electric 12,1%market share. *ACEA*, σ. 1.
- Gavrilas, M. (2010, October). *Heuristic and Metaheuristic Optimization techniques with Application to Power Systems*. Ανάκτηση July 04, 2023, από Heuristic and metaheuristic optimization techniques with application to power systems.
- Harder, H. d. (2023, February 28). Exact Algorithm or Heuristic? *Towards Data Science*, σ. 1.
- Jing Teng, T. C. (2019). Integrated Approach to Vehicle Scheduling and Bus Timetabling for an Electric Bus Line. *Journal of Transportation Engineering ,Part A : Systems*, 146(2), 10.
- K.Gkiotsalitis, C. K. (2023). An exact approach for the multi-depot electric bus scheduling problem with time windows. *ELSEVIER: European Journal of Operational Research*, 306(1), 189-206.
- King.J. (2007-10). The King review of low -carbon cars. *Transportation research board*.
- Li, J. -Q. (2013, Juny 25). Transit Bus Scheduling with Limited energy. Ανάκτηση October 3, 2023
- Liu Kai, G. H. (2021). Optimal charging strategy for large-scale electric buses considering resource constraints. *ELSEVIER:Transportation Research Part D:Transport and Environment*, 99, 1.
- M.Wen, E. (2016). An adaptive large neighborhood search heuristic for the Electric Vehicle Scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 73, 73-83.
- Mahmoud, G. . (2016). Electric buses:A review of alternative powertrains. *Elsevier*, 673-684, 12.
- Maria Gulnara Baldoquin, A. J.-C. (2018). A model for solving vehicle scheduling problems:a case study. *Revista Facultad de Ingenieria universidad de Antioquia*.
- Matias Alvo, G. A. (2021). An exact solution approach for an electric bus dispatch problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 156.
- Mehdi Etezadi-Amoli, K. C. (2010, July). Rapid-Change Electric -Vehicle Stations. *IEEE*.

- Millner, A. (2010). Modeling lithium ion battery degradation in electric vehicles. *IEEE Conference Publication*, 349-356.
- Mohammad Sadrani, A. T. (2023). Bus Scheduling with Heterogeneous Fleets: A Proposal and Analysis of Computational Intelligence Algorithms. *SSRN*, 52.
- Richard Bronson, G. N. (1997). *Schaum's outline of theory and problems of Operation Research* (2 εκδ.). Schaum's outlines.
- S. Bunte, N. (2010). An overview on vehicle scheduling models. *Public Transport*, 1(4), 299-317.
- Samuel Pelletier, O. J. (2016, February 9). *Transportation Science*. Ανάκτηση 9 29, 2023
- Schunk Transit Systems. (2024). Schunk Transit Systems. Ανάκτηση July 01, 2023, από Conductive charging solutions for electric buses.
- Shaun Conrad. (2023, December 10). *What is Objective Function?* Ανάκτηση July 03, 2023, από My Accounting Course.
- Shyam S.G. Perumal, R. M. (2022). Electric bus planning & scheduling : A review of related problems and methodologies. *European Journal of Operational Research*, 301(2), 395-413.
- U.S. Department of Energy. (χ.χ.). Developing Infrastructure to change electric vehicles. *Alternative Fuels Data Center*, σ. 1.
- United Nations. (2018). *The World's Cities in 2018*.
- Welverton R. Silva, F. L. (2023, May 20). On the approximability and energy-flow modeling of the electric vehicle sharing problem. *Institute of Computing, University of Campinas*, σ. 22.
- Xindi Tang, X. L. (2019). Robust scheduling strategy of electric bus under stochastic traffic conditions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 105, 163-182.
- Yahong Liu, C. c. (2022). A two-stage approach with a departure time based solution representation for electric bus vehicle scheduling. *IEEE Access*, 10.
- Yindong Shen, Y. L. (2023). Electric vehicle scheduling based on stochastic trip time and energy consumption. *Computers & Industrial Engineering*, 177.
- Young-Dae Ko, Y. J. (2011). Optimal design of on-line electric vehicle. *41st International Conference on Computers & Industrial Engineering*.
- Α. Σταθόπουλος, Μ. (2016). *Σχεδιασμός Μεταφορικών Συστημάτων* (2^η εκδ.). Αθήνα: Παπασωτηρίου Εκδόσεις.
- Μ. Γ. Καρλαύτης, Κ. &. (2009). *Συστήματα Αστικών Συγκοινωνιών*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

```
# Diplomatiki ergasia
import gurobipy as gp
import matplotlib
from gurobipy import GRB
import random
import math
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
from matplotlib import style
import matplotlib
matplotlib.use('TkAgg')
matplotlib.use('TkAgg')

K = 19
S = 13
V = 23

# SETS

#σύνολο διαθέσιμων ηλεκτρικών οχημάτων
K = {1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19}
K = tuple(K)
#σύνολο σταθμών φόρτισης
S = {1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13}
S = tuple(S)
#σύνολο ταξιδιών
V = {1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23}
V = tuple(V)

Vo = {0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23}
#σύνολο ταξιδιών που μπορούν να πραγματοποιηθούν με όχημα k
#Vk = ( k for k in range (1,V+1))
#print(Vk)

#PARAMETERS

#κόστος ενέργειας = σταθερό
p = 0.08
print(p)

#προϋπολογισμός του φορέα εκμετάλλευσης = σταθερό
β = 190000
print(β)

#ταχύτητα φόρτισης = kwh/h
r = 120
print(r)
```

```

#ελάχιστη κατάσταση φόρτισης = %
SoCmin = 20
print(SoCmin)

#χρόνος ξεκινήματος του ταξιδιού i
τ_i =
{1:5,2:10,3:15,4:20,5:25,6:30,7:35,8:40,9:45,10:50,11:55,12:60,13:65,14:70,15:75,16
:80,17:85,18:90,19:95,20:100,21:105,22:110,23:115}
print(τ_i)

#κατανάλωση ενέργειας κατά την εκτέλεση του ταξιδιού i
Φ_i =
{1:35,2:20,3:31,4:43,5:52,6:22,7:34,8:40,9:45,10:38,11:55,12:45,13:51,14:43,15:46,1
6:36,17:42,18:39,19:34,20:20,21:25,22:35,23:45}
print(Φ_i)

#χωρητικότητα μπαταρίας των οχημάτων = σταθερό
SoCmax = 350
print(SoCmax)

#χρόνος ξεκινήματος του ταξιδιού j
τ_j =
{1:425,2:433,3:446,4:454,5:465,6:440,7:430,8:425,9:445,10:440,11:452,12:440,13:42
9,14:433,15:445,16:450,17:438,18:435,19:444,20:451,21:422,22:434,23:447}
print(τ_j)

#χρόνος οδήγησης έως το αμαξοστάσιο για φόρτιση
T = 20
print(T)

#χρόνος διαδρομής
#ω_i =
{1:20,2:23,3:31,4:34,5:40,6:30,7:22,8:40,9:23,10:19,11:25,12:31,13:36,14:40,15:27,1
6:29,17:45,18:25,19:43,20:39}
ω_i = {i:100 for i in V}
print(ω_i)

#κατανάλωση ενέργειας από το αμαξοστάσιο στην αφετηρία
L = 100
print(L)

bigM = 100000

# Initialize the Gurobi model
model = gp.Model()

# VARIABLES
#εάν το όχημα k εκτελεί ή όχι ταξίδι = δυαδική μεταβλητή

```

```

Y = model.addVars(K, vtype=GRB.BINARY, name="Yk") #y_k
YY = model.addVars(K, vtype=GRB.CONTINUOUS, name="YYk")
δ = model.addVars(K, vtype=GRB.BINARY, name="δk")
#εάν το ταξίδι j εκτελείται μετά το ταξίδι i από το ίδιο ηλεκτρικό όχημα k , τότε
Xkij= 1 αλλιώς Xkij= 0 = δυαδική μεταβλητή
X = model.addVars(K, V, V, vtype=GRB.BINARY, name="Xkij")
#χρόνος φόρτισης του οχήματος k όταν εκτελεί το ταξίδι j μετά το ταξίδι i
t = model.addVars(K, V, V, vtype=GRB.INTEGER, name="tkij") #tkij
#κατάσταση φόρτισης του οχήματος k αφού εκτελεστεί το ταξίδι i
SoC = model.addVars(K, V, vtype=GRB.CONTINUOUS, name="SoCki") # SoCki
#ενέργεια στη τοποθεσία
SoCkij = model.addVars(K, V, V, vtype=GRB.CONTINUOUS, name="SoCkij")
#SoCkij
#εάν το όχημα k έχει αλλάξει μεταξύ των διαδρομών i και j = δυαδική μεταβλητή
b = model.addVars(K, V, V, vtype=GRB.BINARY, name="bkij") #bkij

# CONSTRAINTS
model.addConstrs(sum(sum(X[k, i, j] for i in V if j!= i) for k in K) == 1 for j in V )

model.addConstrs(sum(sum(X[k, i, j] for j in V if i!= j) for k in K) == 1 for i in V)

model.addConstr(sum(sum(X[k, 0, i] for i in V) for k in K) == sum(sum(X[k, j, 0] for
j in V) for k in K))

model.addConstrs(Y[k] == 1 - YY[k] for k in K)

model.addConstrs(YY[k] >= (1- (sum(sum(X[k, i, j] for j in V) for i in V))) for k in
K)

model.addConstrs(YY[k] >= 0 for k in K)

model.addConstrs(YY[k] <= (1- (sum(sum(X[k, i, j] for j in V) for i in V))) + δ[k] *
bigM for k in K)

model.addConstrs(YY[k] <= (1- δ[k]) * bigM for k in K)

model.addConstrs(SoCkij[k, i, j] + Φ_i[i] >= SoCmin for i in V for j in V for k in K)

model.addConstrs((X[k, i, j] * τ_j[j] >= (τ_i[i] + ω_i[i] + t[k, i, j] + 2 * T) * X[k, i, j]
for i in V for j in V for k in K))

model.addConstrs(t[k, i, j] == (X[k, i, j] * (SoCmax - SoCkij[k, i, j])) * (1/r) for i in V
for j in V for k in K)

model.addConstrs((SoCkij[k, i, j] == (SoC[k, i] - Φ_i[i]) * (1-b[k, i, j]) +(SoCmax -
L)*b[k, i, j]) for i in V for j in V for k in K)

model.addConstrs(sum(b[k, i, j] for k in K) <= 1 for j in V for i in V)

model.addConstrs(b[k, i, j] <= X[k,i,j] for i in V for j in V for k in K)

```

```
model.addConstr(sum(sum(sum((b[k, i, j] * t[k, i, j] * r * p) for j in V) for i in V) for
k in K) <= beta)
```

```
# Set objective: minimize
model.setObjective(sum(Y[k] for k in K), GRB.MINIMIZE)
model.optimize()
```

```
if model.status == gurobipy.GRB.OPTIMAL:
    model.printAttr('X') # check if the solver is capable of finding an optimal solution
    print(model.status, 'optimal')
    print('Obj: %g' % model.objVal)
else:
    print(model.status, 'not optimal')
```

```
model.printAttr('X')
```