



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΠΑΝΤΟΓΡΑΦΩΝ ΓΙΑ ΟΠΟΡΤΟΥΝΙΣΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΛΕΩΦΟΡΕΙΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ**



ΑΓΙΑΝΟΓΛΟΥ ΣΤΑΜΑΤΙΝΑ

cv18060

Επιβλέπων:

ΓΚΙΟΤΣΑΛΙΤΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ - ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2025



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

DIPLOMA THESIS

INVESTIGATION OF PANTOGRAPH INSTALLATION FOR OPPORTUNISTIC
CHARGING OF ELECTRIC BUSES IN THE ATHENS NETWORK



AGIANOGLOU STAMATINA

cv18060

Supervisor:

GKIOTSALITIS KONSTANTINOS – ASSISTANT PROFESSOR

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

Athens, October 2025

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Γκιοτσαλίτη Κωνσταντίνο για την ανάθεση του θέματος της διπλωματικής εργασίας, την εξαιρετική καθοδήγηση του και την άριστη συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της. Επίσης οφείλω να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στην Μαριλένα Μεράκου, Υποψήφια Διδάκτωρ της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την πολύτιμη βοήθεια, την υποστήριξη και την υπομονή της, στοιχεία καθοριστικά για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη διαρκή τους στήριξη, την υπομονή και την ενθάρρυνσή τους στην διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά τη στρατηγική τοποθέτηση σταθμών φόρτισης με παντογράφο για **οπορτουνιστική φόρτιση** ηλεκτρικών λεωφορείων στο δίκτυο της Αθήνας. Το θέμα είναι ιδιαίτερα επίκαιρο, καθώς η κλιματική αλλαγή και οι δεσμεύσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης για μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα απαιτούν την ταχεία μετάβαση σε πιο βιώσιμα μέσα μεταφοράς. Η αγορά ηλεκτρικών λεωφορείων στην Ελλάδα αυξάνεται με ταχύ ρυθμό, όμως η επιτυχής ένταξή τους στο συγκοινωνιακό δίκτυο προϋποθέτει την ανάπτυξη κατάλληλων υποδομών φόρτισης. Η παραδοσιακή μέθοδος φόρτισης στα αμαξοστάσια, αν και ευρέως διαδεδομένη, συνεπάγεται αυξημένο κόστος. Βασικοί λόγοι που συμβάλλουν σε αυτό είναι η ανάγκη για μεγάλες μπαταρίες, η δρομολόγηση επιπλέον διαδρομών που εκτελούν τα οχήματα ώστε να μεταβούν για φόρτιση και η διαμόρφωση σταθμών φόρτισης, οι οποίοι απαιτούν σχετικά μεγάλες εκτάσεις. Επομένως, εναλλακτικές λύσεις, όπως η οπορτουνιστική φόρτιση (**παντογράφοι**) παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και πλεονεκτήματα σε ότι αφορά το απαιτούμενο κόστος. Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύχθηκε ένα **μαθηματικό μοντέλο** μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (**MILP**) το οποίο αναζητά τον απαιτούμενο αριθμό παντογράφων και την τοποθεσία τους ώστε να **ελαχιστοποιηθεί το κόστος** εγκατάστασης, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα ότι τα ηλεκτρικά λεωφορεία διαθέτουν επαρκή ενέργεια για την ολοκλήρωση των ημερήσιων δρομολογίων τους. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τις πραγματικές αποστάσεις μεταξύ των στάσεων, την κατανάλωση ενέργειας, τον ρυθμό φόρτισης σε τερματικούς σταθμούς και ενδιάμεσες στάσεις, καθώς και περιορισμούς σχετικά με το επιτρεπτό εύρος του επιπέδου της μπαταρίας. Για την εφαρμογή του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα GTFS του **ΟΑΣΑ** για τις λεωφορειακές γραμμές 021 (Πλατεία Κάνιγγος – Γκύζη), 022 (Ακαδημία – Νέα Κυψέλη), 025 (Ιπποκράτους – Προφήτη Δανιήλ) και 026 (Ιπποκράτους – Βοτανικός). Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε σε γλώσσα προγραμματισμού Python για τον υπολογισμό των αποστάσεων και των ενεργειακών αναγκών, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι προήλθαν από τη διεθνή βιβλιογραφία.

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης έδειξαν ότι η τοποθέτηση **6 παντογράφων** επαρκεί για την αδιάλειπτη λειτουργία και των **τεσσάρων γραμμών**. Οι παντογράφοι κατανέμονται στρατηγικά στο δίκτυο, επιτρέποντας την από κοινού χρήση των υποδομών φόρτισης και συνεπώς τη μείωση του συνολικού κόστους. Η ανάλυση ανέδειξε τη σημασία της σχεδίασης σε **επίπεδο δικτύου** και όχι αποκλειστικά σε επίπεδο γραμμής, καθώς η συνεργατική αξιοποίηση των στάσεων οδηγεί σε οικονομικότερες και αποδοτικότερες λύσεις.

Η συνεισφορά της εργασίας έγκειται στην ανάδειξη της χρησιμότητας των μαθηματικών μοντέλων βελτιστοποίησης στη λήψη αποφάσεων για την ηλεκτροκίνηση των αστικών συγκοινωνιών. Τα συμπεράσματα προσφέρουν χρήσιμες κατευθύνσεις για τους αρμόδιους φορείς του συγκοινωνιακού σχεδιασμού, δείχνοντας ότι περιορισμένη αλλά στρατηγικά τοποθετημένη υποδομή φόρτισης μπορεί να υποστηρίξει την πλήρη λειτουργία ηλεκτρικών λεωφορείων με χαμηλό κόστος.

Τέλος, προτείνονται θέματα για μελλοντική έρευνα, όπως η επέκταση του μοντέλου σε ένα μεγαλύτερο τμήμα του δικτύου της **Αθήνας**, επιτρέποντας την ταυτόχρονη ανάλυση πολλών γραμμών με διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά. Μια συγκριτική οικονομική μελέτη μεταξύ της οπορτουνιστικής φόρτισης και άλλων μεθόδων, θα μπορούσε να προσφέρει μια σαφέστερη εικόνα για τον πιο αποδοτικό συνδυασμό τεχνολογιών. Επιπλέον, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ενσωμάτωση παραγόντων αβεβαιότητας στο μοντέλο, όπως η ζήτηση επιβατών, η διάρκεια παραμονής στις στάσεις και η κατανάλωση ενέργειας υπό συνθήκες αβεβαιότητας, προκειμένου να ενισχυθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων σε πραγματικές συνθήκες. Συνολικά, η εργασία υπογραμμίζει ότι η οπορτουνιστική φόρτιση μπορεί να αποτελέσει καταλύτη για την πράσινη μετάβαση των αστικών μεταφορών στην Αθήνα και σε άλλες ευρωπαϊκές πόλεις.

SUMMARY

This diploma thesis investigates the strategic placement of pantograph charging stations for **opportunistic charging** of electric buses in the Athens network. The topic is particularly timely, as climate change and the European Union's commitments to reducing carbon dioxide emissions demand a rapid transition to more sustainable modes of transport. The electric bus market in Greece is expanding rapidly, but their successful integration into the public transport system requires the development of appropriate charging infrastructure. The conventional method of depot charging, although widely applied, entails high costs due to the need for large batteries, additional non-revenue trips for charging, and significant land requirements. For this reason, alternative solutions such as opportunistic (**pantographs**) charging present considerable interest.

In this context, a mixed-integer linear programming (**MILP**) model was developed to determine the required number and locations of pantographs so as to minimize installation costs, while ensuring that electric buses maintain sufficient energy to complete their daily routes. The model accounts for actual distances between stops, energy consumption, charging rates at both terminal and intermediate stops, and constraints regarding the permissible state-of-charge range of the battery. To implement the model, GTFS data provided by **OASA** were used for bus lines 021 (Plateia Kanigkos – Gkizi), 022 (Akadimia – Nea Kypseli), 025 (Ippokratous – Profitis Daniil) and 026 (Ippokratous – Votanikos). Data processing was carried out in Python to calculate distances and energy requirements, while additional parameters were drawn from the international literature.

The optimization results showed that the placement of **6 pantographs** is sufficient to guarantee the uninterrupted operation of **all four lines**. The pantographs are strategically distributed within the network, enabling shared use of charging infrastructure and thus reducing overall costs. The analysis highlighted the importance of planning at the **network** rather than at the line level alone, since shared use of stops leads to more economical and efficient solutions.

The contribution of this thesis lies in demonstrating the usefulness of optimization models in decision-making for the electrification of urban transport. The findings provide valuable guidance for the relevant transport planning authorities, showing that limited but strategically placed charging infrastructure can support the full operation of electric buses at low cost.

Finally, topics for future research are proposed, such as extending the model to a larger portion of **Athens' network**, allowing the simultaneous analysis of multiple lines with different operational characteristics. A comparative economic study between opportunistic charging and other methods could provide a clearer understanding of the most efficient combination of technologies. Furthermore, particular interest lies in incorporating uncertainty factors into the model, such as passenger demand, dwell times at stops, and energy

consumption under uncertain conditions, in order to enhance the reliability of the results in real-world scenarios. Overall, the study emphasizes that opportunistic charging can serve as a catalyst for the green transition of urban transport in Athens and other European cities.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	11
<i>Εικόνα 1</i> Αγορά λεωφορείων μηδενικών ρύπων για το 2023 στην ΕΕ (Source: Transport & Environment TE)	12
<i>Εικόνα 2</i> Παντογράφος (α) άνω και (β) κάτω.....	15
2. Βιβλιογραφία	17
<i>Πίνακας 2.1</i> Αντικείμενο Ερευνών της Βιβλιογραφίας.....	21
3. Μαθηματικό Μοντέλο	22
<i>Πίνακας 3.1</i> Συμβολισμοί	23
4. Συλλογή Στοιχείων	25
<i>Διάγραμμα 4.1</i> Αρχεία και ροή δεδομένων για τη δομή του μοντέλου.....	25
<i>Πίνακας 4.1</i> Οι συντεταγμένες X και Y των στάσεων της γραμμής 021	26
<i>Πίνακας 4.2</i> Οι συντεταγμένες X και Y των στάσεων της γραμμής 022	27
<i>Πίνακας 4.3</i> Οι συντεταγμένες X και Y των στάσεων της γραμμής 025	28
<i>Πίνακας 4.4</i> Οι συντεταγμένες X και Y των στάσεων της γραμμής 026	29
<i>Πίνακας 4.5</i> Χαρακτηριστικά των γραμμών 021, 022, 025 και 026	30
<i>Πίνακας 4.6</i> Ταξίδια που εκτελούν τα οχήματα.....	30
5. Εφαρμογή και Αποτελέσματα.....	31
<i>Χάρτης 5.1</i> Οι λεωφορειακές γραμμές 021, 022, 025 και 026 και οι τοποθεσίες παντογράφων.....	33
Συμπεράσματα	34
Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	36
Παράρτημα.....	41

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΣΤΑΘΜΩΝ ΟΠΟΡΤΟΥΝΙΣΤΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΓΙΑ ΔΥΟ ΛΕΩΦΟΡΕΙΑΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ

Αγιάνογλου Σταματίνα^a

^a Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Εργαστήριο Σιδηροδρομικής και Μεταφορών, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, 15773 Αθήνα, Ελλάδα

E-mail: cv18060@central.ntua.gr

Σύνοψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά την στρατηγική τοποθέτηση παντογράφων για **οπορτουνιστική φόρτιση** σε κομβικές στάσεις δύο λεωφορειακών γραμμών του δικτύου της Αθήνας, όταν αυτές εξυπηρετούνται από ηλεκτρικά λεωφορεία και με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης αυτών. Το παρόν θέμα είναι ιδιαίτερα επίκαιρο καθώς όλο και περισσότερες χώρες ακολουθούν την κατεύθυνση της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την υιοθέτηση ηλεκτρικών λεωφορείων ώστε να συμβάλλουν στην μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Στη παρούσα έρευνα αναπτύχθηκε **γραμμικό μοντέλο** μικτού ακέραιου προγραμματισμού (**MILP**), το οποίο διερευνά τη βέλτιστη τοποθέτηση σταθμών οπορτουνιστικής φόρτισης λαμβάνοντας υπόψιν τις αποστάσεις μεταξύ των στάσεων, την αυτονομία των λεωφορείων και την κατανάλωση ενέργειας κατά την μετακίνηση του οχήματος αλλά και κατά την παραμονή του στους τερματικούς σταθμούς. Το μικτό ακέραιο γραμμικό μοντέλο που αναπτύχθηκε κατέδειξε ότι για την λειτουργία των γραμμών 021 Πλατεία Κάνιγγος – Γκύζη, 022 Ακαδημία – Νέα Κυψέλη, 025 Ιπποκράτους – Προφήτη Δανιήλ και 026 Ιπποκράτους – Βοτανικός, απαιτείται η τοποθέτηση **6 παντογράφων** ως εξής: στις στάσεις ‘Αχιλλέως’ της γραμμής 025, ‘Μυκάλης’ της γραμμής 026, ‘Μοναστηράκι’ της γραμμής 026 και στην κοινόχρηστη στάση ‘Ιπποκράτους’, η οποία είναι και τερματικός σταθμός. Το αντικείμενο έρευνας της παρούσας εργασίας κρίνεται ιδιαίτερα ωφέλιμο για την λήψη αποφάσεων σχετικά με την φόρτιση των ηλεκτρικών λεωφορείων ενώ παρουσιάζονται περιθώρια έρευνας για την εφαρμογή του μοντέλου σε ένα μεγαλύτερο δίκτυο, την οικονομική σύγκριση μεθόδων φόρτισης και την συμπερίληψη αβεβαιοτήτων σε σχέση με την κατανάλωση ενέργειας και τους χρόνους παραμονής στους τερματικούς σταθμούς.

Λέξεις κλειδιά: παντογράφοι, γραμμικός προγραμματισμός, MILP, οπορτουνιστική φόρτιση, ηλεκτρικά λεωφορεία

Εισαγωγή

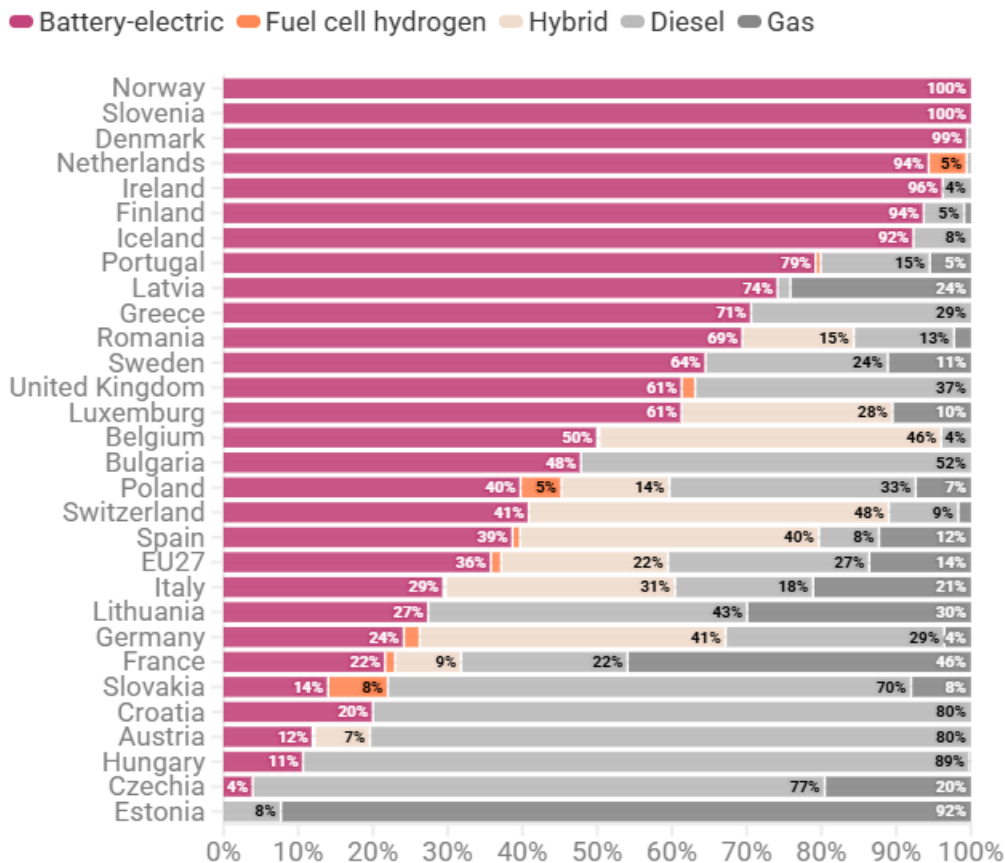
Η κλιματική αλλαγή αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες απειλές για τον 21ο αιώνα και συνεπώς η επιτακτική ανάγκη για την ανάληψη μέτρων έχει αναγνωριστεί και θεσμοθετηθεί σε διεθνές, περιφερειακό και εθνικό επίπεδο (**Βέττας Νίκος, 2023**). Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας, οι μεταφορές ευθύνονται για περίπου το ένα πέμπτο των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), φτάνοντας το 24% αν λάβουμε υπόψη μόνο τις εκπομπές CO₂ από την ενέργεια (**Hannah Ritchie, 2020**). Μάλιστα, το μεγαλύτερο μέρος αυτού του ποσοστού προέρχεται από επιβατικά οχήματα — αυτοκίνητα και λεωφορεία — συνεισφέροντας κατά 45,1%. Επιπλέον, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι στην έκθεσή του για τις Προοπτικές Ενεργειακής Τεχνολογίας, ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (IEA) αναμένει ότι οι παγκόσμιες μεταφορές (μετρούμενες σε επιβατικά χιλιόμετρα) θα διπλασιαστούν, τα ποσοστά ιδιοκτησίας αυτοκινήτων θα αυξηθούν κατά 60% και η ζήτηση για επιβατικές και εμπορευματικές αερομεταφορές θα τριπλασιαστεί έως το 2070 (**Hannah Ritchie, 2020**).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει σε εφαρμογή φιλόδοξους στόχους για τη μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από τα βαρέα επαγγελματικά οχήματα, στα οποία περιλαμβάνονται και τα λεωφορεία. Σύμφωνα με την απόφαση του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου (**European Parliament, 2024**), μέχρι το 2030 οι εκπομπές CO₂ θα πρέπει να μειωθούν κατά 45% για την περίοδο 2030-2034, 65% για το 2035-2039 και 90% έως το 2040.

Καθώς οι ευρωπαϊκές χώρες εναρμονίζονται με αυτή την κατεύθυνση, η υιοθέτηση ηλεκτρικών λεωφορείων (ΕΒ) αναδεικνύεται ως βασικό μέτρο για τη μείωση των εκπομπών στον τομέα της μεταφοράς επιβατών. Παρά το γεγονός ότι βρίσκεται στα αρχικά της στάδια, η αγορά ηλεκτρικών λεωφορείων επεκτείνεται, καθοδηγούμενη από τις τεχνολογικές εξελίξεις και τα υποστηρικτικά ρυθμιστικά πλαίσια (**European Alternative Fuels Observatory, 2024**). Είναι αξιοσημείωτο ότι το 2023 το 36% των πωλήσεων λεωφορείων στην ΕΕ ήταν ηλεκτροκίνητα, ξεπερνώντας για πρώτη φορά τις πωλήσεις των οχημάτων που κινούνται με καύσιμο πετρελαίου. Στο παρακάτω γράφημα (**Max Molliere, 2024**) διακρίνεται ότι η Νορβηγία, η Σλοβενία, η Δανία, η Ολλανδία και η Ιρλανδία πρωτοστατούν σε αυτόν τον τομέα, καθώς ποσοστό μεγαλύτερο του 90% των λεωφορείων που αγόρασαν για το 2023 ήταν ηλεκτρικά. Η Ελλάδα είναι η 10η χώρα στην κατάταξη καταφέροντας να ξεπεράσει κατά πολύ τον μέσο όρο, με το 71% των λεωφορείων που απέκτησε το 2023 να είναι ηλεκτρικά. Αξίζει να επισημανθεί ότι το 2022, το αντίστοιχο ποσοστό για την Ελλάδα ήταν μόλις 14%, γεγονός που καταδεικνύει ότι η Ελλάδα οδεύει δυναμικά προς την ηλεκτροκίνηση.

Zero-emission urban buses: who leads?

New city bus sales in 2023 ▼



Εικόνα 1 Αγορά λεωφορείων μηδενικών ρύπων για το 2023 στην ΕΕ (Source: Transport & Environment TE)

Καθοριστικός παράγοντας στην επιτυχημένη ενσωμάτωση και διάθεση των ηλεκτρικών λεωφορείων στο συγκοινωνιακό δίκτυο είναι η ανάπτυξη και εφαρμογή αποδοτικών εγκαταστάσεων φόρτισης. Τα ηλεκτρικά λεωφορεία φορτίζονται κατά κύριο λόγο με δύο τρόπους: φόρτιση στο αμαξοστάσιο (depot charging) και φόρτιση εν ώρα δρομολογίου (en-route charging).

Η φόρτιση στο αμαξοστάσιο είναι η πιο κοινή μέθοδος φόρτισης. Περιλαμβάνει την επαναφόρτιση των ηλεκτρονικών λεωφορείων στο αμαξοστάσιο συνήθως με φορτιστές plug-in, αξιοποιώντας τις ώρες εκτός αιχμής, όταν τα λεωφορεία δεν λειτουργούν και το ηλεκτρικό ρεύμα είναι φθηνότερο. Το πρωταρχικό πλεονέκτημα της είναι η απλότητα και η οικονομική της αποδοτικότητα, καθώς αξιοποιεί την ηλεκτρική υποδομή στο αμαξοστάσιο και αποφεύγει την ανάγκη επιπλέον επένδυσης σε εξοπλισμό φόρτισης υψηλής ισχύος (Editorial Board EVBoosters, 2024).

Εξαιτίας της ευρείας χρήσης της μεθόδου φόρτισης στο αμαξοστάσιο, στη βιβλιογραφία εντοπίζονται πολλές μελέτες που έχουν ερευνήσει σε βάθος προβλήματα σχεδιασμού, λειτουργίας και ελέγχου. Για παράδειγμα, η **(Kun An, 2022)** ανέπτυξε ένα στοχαστικό ακέραιο μοντέλο προγραμματισμού (stochastic integer programming model) που βελτιστοποιεί τις τοποθεσίες των σταθμών φόρτισης και το μέγεθος του στόλου λαμβάνοντας υπόψη την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας κατά τον χρόνο χρήσης και τη ζήτηση φόρτισης. Η **(Shaohua Cui, 2023)** παρουσίασε ένα πρόβλημα προγραμματισμού οχημάτων που φορτίζονται σε διαφορετικά αμαξοστάσια, για μικτούς στόλους με ηλεκτρικά λεωφορεία και ντίζελ, και πρότεινε την κατανομή «χρονικού περιθωρίου» στα δρομολόγια για να μετριαστεί ο αντίκτυπος της χρονικής αβεβαιότητας. Η **(Nicolas Dirks, 2022)** εισήγαγε ένα μικτό ακέραιο μοντέλο προγραμματισμού (mixed integer programming model) που εξετάζει πολλαπλά στρατηγικά σχέδια (π.χ. σχεδιασμός δικτύου φόρτισης) και αποφάσεις λειτουργικού σχεδιασμού (π.χ. αναθέσεις λεωφορείων ανά ταξίδι) ταυτόχρονα. Επιπλέον, η **(Zhang, 2021)** εστίασε στο πρόβλημα προγραμματισμού ηλεκτρικών οχημάτων πολλαπλών σταθμών και πολλαπλών τύπων οχημάτων με στρατηγική μερικής μεικτής διαδρομής και μερικής επαναφόρτισης ώστε να επιτευχθεί χαμηλότερο κόστος.

Ωστόσο, παρά την εκτεταμένη ανάπτυξη της μεθόδου, η φόρτιση στο αμαξοστάσιο παρουσιάζει κάποιες δυσκολίες στην εφαρμογή της. Η **(Bi et al., 2023)** εξηγεί ότι για να μπορέσουν τα λεωφορεία να εκτελέσουν δρομολόγια για μια ολόκληρη μέρα απαιτείται να έχουν μεγάλη χωρητικότητα μπαταρίας η οποία έχει υψηλό κόστος, αυξάνει το βάρος των λεωφορείων και μειώνει τη χωρητικότητα σε επιβάτες. Επίσης, όταν τα λεωφορεία εκτελούν μεγάλα δρομολόγια χρειάζονται επιπλέον φόρτιση κατά τη διάρκεια της ημέρας, με συνέπεια να μην αξιοποιούνται πλήρως και να καταναλώνονται μεγάλα ποσά ενέργειας σε νεκρά ταξίδια ώστε να φτάσουν στα αμαξοστάσια. Ακόμα, ένα σύνθετο πρόβλημα είναι η απόκτηση γης για την τοποθέτηση των αμαξοστασίων και των σταθμών φόρτισης με τον πλέον αποδοτικό τρόπο.

Συνεπώς το ερευνητικό ενδιαφέρον επεκτείνεται και σε άλλες, εναλλακτικές μεθόδους φόρτισης οι οποίες παρέχουν μεγαλύτερη ευελιξία και αυτονομία καθώς καθιστούν εφικτή τη φόρτιση εν ώρα δρομολογίου. Κάποιες από αυτές τις διαθέσιμες μεθόδους στην αγορά είναι η αλλαγή μπαταρίας και η ασύρματη φόρτιση, τις οποίες θα αναφέρουμε εν συντομία.

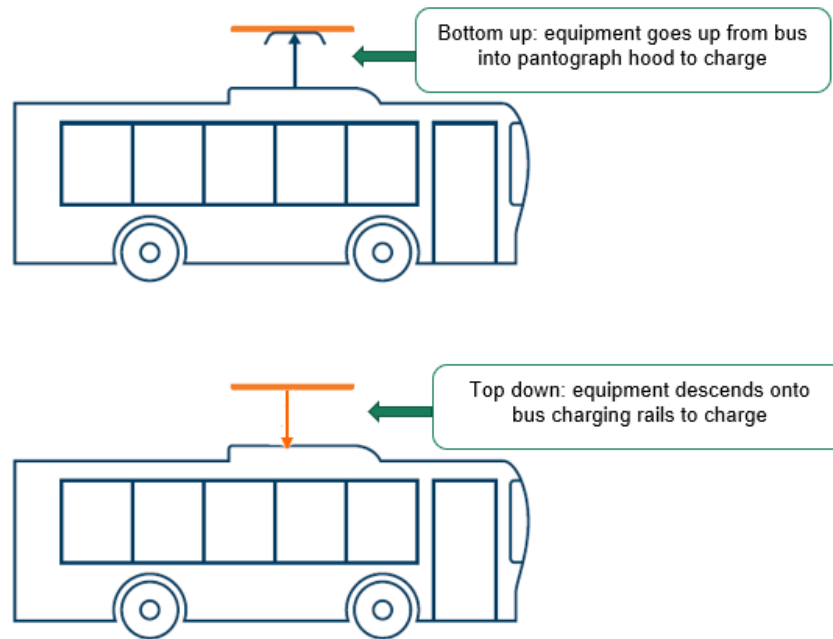
Η αλλαγή μπαταρίας γίνεται σε σταθμούς αποθήκευσης μπαταριών που είναι τοποθετημένοι σε διάφορα σημεία του δρομολογίου, και οι οποίοι έχουν εγκατεστημένο έναν μηχανισμό-ρομπότ που πραγματοποιεί αυτή τη διαδικασία. Ένα ηλεκτρικό λεωφορείο εξοπλισμένο με μηχανισμό ανταλλαγής μπαταριών εκτελεί τις καθορισμένες διαδρομές. Όταν η ενέργεια της μπαταρίας στο λεωφορείο εξαντλείται, το ηλεκτρικό λεωφορείο ειδοποιείται για να επισκεφτεί το σταθμό ανταλλαγής μπαταριών ώστε να λάβει μία πλήρως φορτισμένη μπαταρία, ενώ η αποφορτισμένη θα επαναφορτιστεί **(Jeongyong KimInho, 2015)**. Σημαντική είναι η συμβολή της **(Hao Wu, 2021)** που παρουσίασε μια ολοκληρωμένη έρευνα των μοντέλων του σταθμού ανταλλαγής μπαταριών για τα ηλεκτρικά λεωφορεία όσον αφορά τους τρόπους λειτουργίας και τα σενάρια λήψης αποφάσεων. Στην ίδια κατεύθυνση, η **(Wenxiang Li, 2018)** ερεύνησε τη δημιουργία νέων δρομολογίων και στρατηγικού προγραμματισμού για στόλους ηλεκτρικών

λεωφορείων και αναζήτησε τον βέλτιστο συνδυασμό μπαταριών και σταθμών ανταλλαγής μπαταριών που θα είναι οικονομικά πιο αποδοτικός.

Η τεχνολογία της δυναμικής ασύρματης μεταφοράς ισχύος (DWPT), παρέχει τη δυνατότητα για φόρτιση εν κινήσει με την εγκατάσταση ειδικών στρωμάτων τοποθετημένων κάτω από το οδόστρωμα που μεταφέρουν επαγωγικά ενέργεια. Αρκετές έρευνες έχουν ασχοληθεί με ζητήματα όπως ο προσδιορισμός της χωρητικότητας των μπαταριών των ηλεκτρικών λεωφορείων σε συνδυασμό με φόρτιση σε τερματικούς σταθμούς (**Xiaoling Luo, 2023**), η βέλτιστη τοποθέτηση της υποδομής (**Young Jae Jang, 2015**) και παράγοντες λειτουργίας των λεωφορείων που επηρεάζουν τις ανάγκες φόρτισης (συχνότητα, ταχύτητα οδήγησης, κόστος ενέργειας κλπ.) (**Ruixiao Sun, 2024**). Αυτή η μέθοδος συμπεριλήφθηκε στις «10 κορυφαίες αναδυόμενες τεχνολογίες για το 2013» στο Παγκόσμιο Οικονομικό Φόρουμ (World Economic Forum) (**Samarendra Pratap Singh, 2021**) και θεωρείται ως πιθανή λύση για το συγκοινωνιακό σύστημα σε πολλές μητροπολιτικές πόλεις στη Νότια Κορέα (**Jeyup S Kwaak, 2013**).

Εντούτοις, στην παρούσα εργασία επιλέξαμε να ασχοληθούμε με μία άλλη μέθοδο φόρτισης η οποία παρουσιάζει και αυτή πολλές προοπτικές, την τεχνολογία φόρτισης με παντογράφο. Εν συγκρίσει με τη συμβατική μέθοδο φόρτισης plug-in που χρησιμοποιείται συνήθως στις αποθήκες, οι παντογράφοι μπορούν να υποστηρίξουν φόρτιση υψηλής ισχύος και να συνδεθούν με το λεωφορείο αυτόματα, χωρίς την παρέμβαση του οδηγού. Συνεπώς, μπορούν να εγκατασταθούν τόσο σε αποθήκες όσο και σε τερματικούς σταθμούς ή ενδιάμεσες στάσεις ώστε τα λεωφορεία να φορτίζονται ευκαιριακά (opportunity charging) την ώρα που εκτελούν δρομολόγιο.

Οι παντογράφοι μπορούν να συνδεθούν με το λεωφορείο με δύο βασικούς τρόπους: με τον ‘παντογράφο άνω’ (pantograph-up) και με τον ‘παντογράφο κάτω’ (pantograph-down), όπως φαίνεται στην Εικόνα 1. Με τον παντογράφο άνω καθώς το λεωφορείο κινείται κάτω από το σταθμό, ένας βραχίονας παντογράφου στην κορυφή του λεωφορείου ανεβαίνει και συνδέεται με το σταθμό φόρτισης εναέριας θέσης. Αντίθετα, με τον παντογράφο κάτω ο μηχανισμός βρίσκεται στην εναέρια υποδομή και κατεβαίνει για να έρθει σε επαφή με το λεωφορείο για φόρτιση (**Daniel Eustace, n.d.**) (**NZ Transport Agency, n.d.**). Οι πιο εξελιγμένοι τεχνολογικά παντογράφοι καθιστούν εφικτή την ενισχυτική φόρτιση σε καθορισμένες στάσεις κατά την επιβίβαση-αποβίβαση των επιβατών διάρκειας μόλις 15-20 δευτερολέπτων (flash charging) (**Bi et al., 2023**).



Εικόνα 2 Παντογράφος (α) άνω και (β) κάτω.

Ένα από τα πρώτα παραδείγματα εφαρμογής του flash charging στην Ευρώπη βρίσκεται σε λειτουργία στη Γενεύη από το 2013. Τα αρθρωτά λεωφορεία (κατασκευασμένα από την HESS) διάστασης 18,7 μέτρων και χωρητικότητας 135 επιβατών, εκτελούν τη διαδρομή από το αεροδρόμιο της Γενεύης έως το Palexpo. Ένας σταθμός φόρτισης Flash 400kW βρίσκεται στο Palexpo και ένας ακόμα ισχύος 200kw βρίσκεται στο τερματικό σταθμό στο αεροδρόμιο της Γενεύης. Τα λεωφορεία σε καθορισμένες στάσεις λαβαίνουν μια flash φόρτιση 600kW σε 15 δευτερόλεπτα ενόσω οι επιβάτες επιβιβάζονται και αποβιβάζονται, ενώ λαβαίνουν και μία επιπλέον φόρτιση 4-5 λεπτών στους τερματικούς σταθμούς, που επιτρέπουν την πλήρη επαναφόρτιση τους (Isabel Carrilero, 2018) (“Picture,” n.d.).

Η (Zhaocai Liu, 2019) εισήγαγε μια ποσοτική οικονομική ανάλυση της ταχείας φόρτισης ηλεκτρικών λεωφορείων, παρέχοντας έτσι ορισμένες κατευθυντήριες γραμμές για τις εταιρίες μεταφορών. Αρχικά προτάθηκε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο βελτιστοποίησης για τον προσδιορισμό του μεγέθους της μπαταρίας, του τύπου φορτιστή και του προγράμματος επαναφόρτισης για μια γενική διαδρομή ηλεκτρικού λεωφορείου. Στη συνέχεια, με βάση αυτό το μοντέλο, πραγματοποιήθηκε μια οικονομική ανάλυση της ταχείας φόρτισης εν ώρα δρομολογίου σε δέκα πραγματικές διαδρομές λεωφορείων και σε μια απλοποιημένη γενική διαδρομή λεωφορείου με διαφορετικές παραμέτρους. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι δεδομένων των τρεχόντων τιμών των σταθμών γρήγορης φόρτισης και των μπαταριών στη διαδρομή, είναι ωφέλιμο να εγκαθίστανται σταθμοί γρήγορης φόρτισης στη διάρκεια της διαδρομής (en-route charging).

Καθώς η τεχνολογία ταχείας φόρτισης με παντογράφο (flash charging) αναπτύσσεται τα τελευταία χρόνια, η εφαρμογή ενός δικτύου ηλεκτρικών λεωφορείων που θα φορτίζεται με παντογράφους είναι ένα ζήτημα με πολλά περιθώρια έρευνας.

Στην παρούσα εργασία θα διερευνήσουμε τη μέθοδο φόρτισης εν ώρα δρομολογίου με παντογράφο και θα εξετάσουμε το ενδεχόμενο τοποθέτησης παντογράφων σε στρατηγικά σημεία και κομβικές στάσεις στο δίκτυο της Αθήνας ώστε τα λεωφορεία να λαμβάνουν την αναγκαία φόρτιση με το χαμηλότερο δυνατό κόστος.

Στην Ενότητα 2 παρουσιάζεται η έρευνα που πραγματοποιήθηκε στη διεθνή βιβλιογραφία καθώς και τα συμπεράσματα που αντλήθηκαν, τα οποία επηρέασαν την παρούσα εργασία. Στην Ενότητα 3 αναπτύσσεται το μαθηματικό μοντέλο του μικτού ακέραιου γραμμικού προβλήματος της στρατηγικής τοποθέτησης παντογράφων που αναπτύχθηκε με σκοπό την βέλτιστη οικονομία. Στην Ενότητα 4 περιγράφεται η διαδικασία συλλογής των στοιχείων για την εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου, ενώ στην Ενότητα 5 εφαρμόζεται το μοντέλο σε τέσσερις λεωφορειακές γραμμές της Αθήνας. Τέλος, στην Ενότητα 6 εξάγονται ορισμένα συμπεράσματα και προτείνονται θέματα για περαιτέρω έρευνα.

2. Βιβλιογραφία

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου, είναι η ανασκόπηση και αξιολόγηση ερευνών και μεθοδολογιών σχετικών με το αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας. Συγκεκριμένα, στην διεθνή βιβλιογραφία αναζητήθηκαν δημοσιευμένες μελέτες για τις προκλήσεις της τοποθέτησης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών λεωφορείων στο συγκοινωνιακό δίκτυο, καθώς και μαθηματικά μοντέλα που επιχειρήσαν να επιλύσουν κάποια από αυτά τα προβλήματα. Έτσι διαπιστώθηκαν κάποια κενά έρευνας και επιλέχθηκε η προσέγγιση της παρούσας εργασίας.

Ορισμένες μελέτες έχουν ασχοληθεί με την σύγκριση διαφορετικών μεθόδων φόρτισης ώστε να οδηγηθούν σε ωφέλιμα συμπεράσματα. Οι **(Nader El-Taweel, 2017)** ανέπτυξαν ένα μοντέλο για να επιλύσουν ένα μικτό ακέραιο γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης (mixed integer linear optimization problem) που αφορά το είδος φόρτισης και τον αριθμό των απαιτούμενων φορτιστών, εξετάζοντας 3 μεθόδους φόρτισης: flash charging, opportunity charging και overnight, ενώ δοκίμασαν το μοντέλο τους σε 3 συγκοινωνιακά δίκτυα με ανομοιογενή στόλο λεωφορείων στο Οντάριο του Καναδά. Η έρευνα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τρεις είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά τον αριθμό και την απαιτούμενη ισχύ των φορτιστών: 1) το μέσο μήκος του ταξιδιού, 2) ο χρόνος αναμονής των λεωφορείων κατά τον οποίο ενδεχομένως φορτίσουν, 3) η απόσταση μεταξύ του χρόνου άφιξης των λεωφορείων στον σταθμό φόρτισης. Μικρότερος χρόνος αναμονής και μικρότερη χρονική απόσταση παρέχουν στο λεωφορείο περισσότερες δυνατότητες φόρτισης κατά την ώρα που δεν εκτελούν δρομολόγιο και συνεπώς ο αριθμός και η απαιτούμενη ισχύς των φορτιστών μειώνονται. Αντίστοιχα, μεγαλύτερο μήκος διαδρομής απαιτεί περισσότερους σταθμούς φόρτισης και μεγαλύτερη ισχύ.

Η **(X. Wang et al., 2023)** αναπτύσσει ένα ολοκληρωμένο μοντέλο προσομοίωσης για τη φόρτιση τριών τύπων: flash, ευκαιριακή και ολονύκτια. Το μοντέλο προσομοίωσης αποτελείται από δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα υπολογίζει την κατανάλωση ενέργειας για κάθε λεωφορείο/διαδρομή και εκχωρεί μια προτεραιότητα φόρτισης σε κάθε λεωφορείο. Ταυτόχρονα, το δεύτερο τμήμα προσομοιώνει το σταθμό φόρτισης και βελτιστοποιεί τον ελάχιστο απαιτούμενο αριθμό φορτιστών για κάθε σενάριο λειτουργίας. Μόλις εντοπιστεί ο ελάχιστος αριθμός φορτιστών, πραγματοποιείται προσομοίωση της λειτουργίας των λεωφορείων σε πραγματικό χρόνο ενώ υπολογίζεται και η επιρροή στο δίκτυο διανομής.

Επίσης αντικείμενο μελέτης έχει αποτελέσει η επιρροή της αβεβαιότητας της ζήτησης για φόρτιση. Η **(Wehres et al., 2016)** παρουσίασε ένα ντετερμινιστικό μικτό ακέραιο μοντέλο για τη βελτιστοποίηση της τοποθεσίας των φορτιστών. Στη συνέχεια, ανέπτυξε έναν ευρετικό αλγόριθμο (Greedy Algorithm) που υπολογίζει την ενέργεια της μπαταρίας σε όλες τις στάσεις για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς υψηλής και κανονικής κατανάλωσης ενέργειας στα τμήματα της διαδρομής και τοποθετεί νέους σταθμούς φόρτισης όταν οι υπάρχοντες δεν επαρκούν για τις ελάχιστες ενεργειακές απαιτήσεις. Η σύγκριση των δύο μεθόδων κατέδειξε ότι ο παράγοντας της αβεβαιότητας μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα δραστικά ανάλογα

με τις υποθέσεις αβεβαιότητας που τίθενται. Ωστόσο, ο ευρετικός αλγόριθμος έχει τον περιορισμό ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλο δίκτυο.

Η **(Bi et al., 2023)** εξετάζει το ζήτημα εκτενέστερα. Λαμβάνει υπόψιν το πρόβλημα της αβεβαιότητας της ζήτησης επιβατών που καθορίζει τον χρόνο που θα παραμείνει το λεωφορείο στη στάση πέραν του οποίου θα υπάρχει καθυστέρηση στην εξυπηρέτηση, και της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας που θα μπορούσε να θέσει το δίκτυο ηλεκτροδότησης σε κίνδυνο. Η διαδικασία απόφασης Markov (MDP) που εφαρμόζεται λαμβάνοντας υπόψιν τις δεδομένες υποδομές φόρτισης και τη θέση τους, βελτιστοποιεί το χρονοδιάγραμμα και τη διάρκεια φόρτισης flash υπό τις αβεβαιότητες που προαναφέρθηκαν, ώστε να διασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία της γραμμής και του δικτύου διανομής. Επιπλέον, με τη Μέθοδο Βαθιάς Ενισχυτικής Μάθησης (Deep Reinforcement Learning Approach) αντιμετωπίζεται το ζήτημα της καθυστερημένης χρέωσης καθώς ο αλγόριθμος εκπαιδεύεται να λαμβάνει αποφάσεις φόρτισης για πραγματικούς χρόνους.

Ένας σημαντικός αριθμός μελετών έχει διερευνήσει την ελαχιστοποίηση του κόστους. Η **(Y. Wang et al., 2022)** εξετάζει το ακέραιο γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης της κατανομής των παντογράφων και του προγραμματισμού του στόλου για να ελαχιστοποιήσει το συνολικό επενδυτικό κόστος, ενώ ικανοποιείται το προκαθορισμένο χρονοδιάγραμμα. Μάλιστα συνυπολογίζει την επιρροή της ζήτησης, του χρόνου παραμονής του λεωφορείου στη στάση και της απόστασης του ταξιδιού σε διάφορες χρονικές περιόδους (εντός αιχμής, μέτριες και εκτός αιχμής) ώστε τα αποτελέσματα του μοντέλου να είναι πιο ρεαλιστικά. Το μοντέλο εξετάζεται ως προς την αποτελεσματικότητά του για τέσσερις γραμμές στο Όσλο της Νορβηγίας. Διεξάγεται μια ανάλυση ευαισθησίας ώστε να διερευνηθεί η απόκριση του συστήματος στο κόστος της μπαταρίας, στο κόστος αγοράς λεωφορείων, στο κόστος εγκατάστασης φορτιστή, στην ισχύ φόρτισης και στον ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας.

Η **(Zeng et al., 2023)** αναπτύσσει ένα μικτό ακέραιο μοντέλο προγραμματισμού (mixed-integer programming model) ώστε να συνδυάσει τη φόρτιση στο σταθμό και τη διαχείριση του στόλου των λεωφορείων με το χαμηλότερο δυνατό κόστος κύκλου ζωής (LCCs), που περιλαμβάνει το κόστος αγοράς, λειτουργίας, συντήρησης και εκπομπών, μειώνοντας έτσι το χάσμα μεταξύ των βέλτιστων αλλά και τις χαμηλότερες εκπομπές. Επειδή το πρόβλημα είναι σύνθετο και ο σκοπός της εργασίας είναι να αναζητήσει ακριβείς μεθόδους βελτιστοποίησης, εισάγεται ένας αλγόριθμος branch-and-price, που μας βοηθάει να το επιμερίσουμε και να το διαχειριστούμε πιο εύκολα. Μελετάται η βελτιστοποίηση της λειτουργίας των λεωφορείων μιας υπάρχουσας γραμμής και προτείνεται να επεκταθεί αυτό το μοντέλο για τον σχεδιασμό πολλών μελλοντικών γραμμών.

Αναζητώντας στη βιβλιογραφία διαπιστώσαμε ότι πολλές ήταν οι έρευνες που εξέτασαν την φόρτιση με παντογράφο για μία μεμονωμένη λεωφορειακή γραμμή ενός δικτύου, όπως η **(Hasan, 2020)** που εφάρμοσε έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης για την εγκατάσταση σταθμών φόρτισης σε μία γραμμή στη Βαρκελώνη με σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους ιδιοκτησίας για τον φορέα εκμετάλλευσης αστικών λεωφορείων και των επιπτώσεων στο δίκτυο διανομής. Άλλες μελέτες επικεντρώθηκαν στα τεχνικά χαρακτηριστικά της

μεθόδου για τους σταθμούς φόρτισης και τις μπαταρίες των λεωφορείων (**Mohammad Shadnam Zarbil, 2022**), (**Amir Abbas Darvish Pour, 2024**). Και ενώ μερικές μελέτες ερεύνησαν το ζήτημα της στρατηγικής τοποθέτησης σταθμών φόρτισης στην κλίμακα ενός συγκοινωνιακού δικτύου, συχνά δεν εξέταζαν την από κοινού αξιοποίηση των στάσεων με παντογράφο από πολλαπλές λεωφορειακές γραμμές. Η (**Matthias Rogge, 2015**) διερεύνησε τις απαιτήσεις ενέργειας και υποδομής για ένα δίκτυο λεωφορείων 23 δρομολογίων στην πόλη Muenster στη Γερμανία. Ωστόσο, η ανάλυση δεν περιλάμβανε την βελτιστοποίηση των τοποθεσιών φόρτισης και όλοι οι τερματικοί σταθμοί θεωρήθηκαν ως οι τοποθεσίες για φόρτιση.

Σύμφωνα με την (**Bálint Csonka, 2023**) η ταυτόχρονη εξέταση πολλών διαδρομών στη διαδικασία βελτιστοποίησης ενισχύει την κοινή χρήση της υποδομής φόρτισης, αυξάνοντας έτσι το ποσοστό χρησιμοποίησής της. Η στρατηγική τοποθέτηση των εγκαταστάσεων φόρτισης αναδεικνύεται ως κρίσιμο στοιχείο που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη συνολική απόδοση των συστημάτων αστικών ηλεκτρικών λεωφορείων. Είναι επιτακτική ανάγκη για τους φορείς εκμετάλλευσης να αξιολογούν προσεκτικά τις επενδύσεις στην υποδομή φόρτισης, καθώς αυτό θα τους παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σχετικά με τις βέλτιστες στρατηγικές φόρτισης και τον καθορισμό των απαιτούμενων φορτιστών.

Μία μελέτη που πλησιάζει περισσότερο το αντικείμενο της έρευνας μας είναι (**Xylia et al., 2017**). Αυτή παρουσίασε ένα μοντέλο για τη βελτιστοποίηση της κατανομής της υποδομής φόρτισης ηλεκτρικών λεωφορείων θεωρώντας ως καταλληλότερους σταθμούς φόρτισης τους σημαντικότερους κόμβους του δικτύου και έπειτα τις αφετηρίες/τερματικούς σταθμούς. Στη συνέχεια εφάρμοσε το μοντέλο σε ένα πραγματικό σενάριο μεγάλης κλίμακας για το λεωφορειακό δίκτυο της Στοκχόλμης στη Σουηδία. Χρησιμοποίησε τη γεωχωρική ανάλυση στο GIS του ArcGIS με είσοδο δεδομένων από την γλώσσα προγραμματισμού Python ενώ η βελτιστοποίηση του κόστους και της ενέργειας έγινε με ένα Γενικό Αλγεβρικό Σύστημα Μοντελοποίησης (General Algebraic Modeling System). Μάλιστα προχώρησε σε οικονομική ανάλυση η οποία έδειξε ότι το χαμηλό κόστος του ρεύματος μπορεί να εξισορροπήσει το μεγάλο κόστος των υποδομών και ότι οι εκπομπές μειώνονται κατά 51%.

Επίσης, η (**Kunith et al., 2016**) εφάρμοσε ένα μικτό ακέραιο γραμμικό μοντέλο βελτιστοποίησης κόστους (mixed-integer linear optimization model) για τον προσδιορισμό της θέσης της στάσης φόρτισης και της χωρητικότητας της μπαταρίας για 17 γραμμές λεωφορείων στο Βερολίνο της Γερμανίας. Αναπτύχθηκαν προφίλ κατανάλωσης ενέργειας για κάθε γραμμή και αναλύθηκαν διαφορετικά σενάρια σχετικά με την ισχύ φόρτισης και τις συνθήκες λειτουργίας (τύπος οχήματος, ταχύτητα, χρόνος παραμονής στη στάση κ.α.). Ωστόσο ενώ λήφθηκαν διαφορετικά σενάρια για την ισχύ φόρτισης δεν έγινε διερεύνηση της απαιτούμενης ισχύος φόρτισης μεμονωμένα σε επίπεδο στάσης, κάτι που οι μελετητές προτείνουν ως θέμα για μελλοντική έρευνα.

Εξίσου σημαντική είναι και η συμβολή της (**Loaiza Quintana, Climent, & Arbelaez, 2022**). Σε αυτή την εργασία αναπτύσσεται ένας μετευρετικός επαναλαμβανόμενος αλγόριθμος τοπικής αναζήτησης (Iterated Local Search) για τη βελτιστοποίηση της θέσης των σταθμών

φόρτισης, βασισμένος στο μικτό αέριο μοντέλο της (Arbelaez & Climent, 2020), ο οποίος ικανοποίησε ορισμένες ιδιότητες του συστήματος μεταφοράς όπως η ζήτηση, και διασφάλισε ότι η περιορισμένη εμβέλεια οδήγησης των λεωφορείων δεν θα επηρεάσει την υπηρεσία. Υιοθετήθηκε μια πιο ευέλικτη προσέγγιση για να ληφθούν υπόψη μικρές αποκλίσεις στο αρχικό χρονοδιάγραμμα που οδηγούν σε μια πιο γενική εκδοχή του προβλήματος. Η αποτελεσματικότητα της προσέγγισής επαληθεύτηκε με τον πειραματισμό σε ένα σύνολο σεναρίων με πραγματικά δεδομένα από 3 πόλεις της Ιρλανδίας: το Λίμερικ, το Κορκ και το Δουβλίνο.

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζεται ενδεικτικά μια σύγκριση των ερευνών ως προς το θέμα με το οποίο ασχολήθηκαν, και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Έρευνα	Τοποθέτηση σταθμών φόρτισης	Εύρεση αριθμού φορτιστών	Εφαρμογή σε πραγματικό δίκτυο	Γεωγραφικά Δεδομένα	Μοντέλο	Κοινές στάσεις	Κατάσταση φόρτισης σε επίπεδο στάσης	Βελτιστοποίηση κόστους
Nader El-Taweel, 2017	√	√	√	-	MILP	-	-	√
X. Wang et al., 2023	√	√	√	-	MINLP	√	√	√
Wehres et al., 2016	√	-	-	-	MILP & Ευρετικό Μοντέλο	-	√	√
Y. Wang et al., 2022	√	√	√	-	MINLP	√	√	√
Zeng et al., 2023	√	√	√	-	MILP	√	√	√
Hasan, 2020	-	√	√	-	Στοχαστικός μετεωρετικός αλγόριθμος (γενετικός αλγόριθμος)	-	√	√
Matthias Rogge, 2015	-	-	√	√	Ντετερμινιστικό μοντέλο προσομοίωσης	√	√	-
Bálint Csonka, 2023	-	-	√	-	MILP	√	-	√
Xylia et al., 2017	√	-	√	√	MILP	-	√	√
Kunith et al., 2016	√	√	√	√	MILP	√	-	√
Loaiza Quintana et al.	√	√	√	√	Μετεωρετικός αλγόριθμος	√	√	-
Arbelaez & Climent, 2020	√	-	√	-	MILP	-	√	-
Παρούσα εργασία	√	√	√	√	MILP	√	√	√

Πίνακας 2.1 Αντικείμενο Ερευνών της Βιβλιογραφίας

3. Μαθηματικό Μοντέλο

Σε αυτή την εργασία αναπτύσσεται ένα μικτό ακέραιο γραμμικό μοντέλο με σκοπό την διερεύνηση τοποθέτησης παντογράφων για οπορτουμιστική φόρτιση σε δύο λεωφορειακές γραμμές του συγκοινωνιακού δικτύου της Αθήνας.

Για την χρονική διάρκεια των ταξιδιών και για όλες τις στάσεις (τερματικούς σταθμούς και ενδιάμεσες στάσεις) υπολογίζεται η ενέργεια που καταναλώνεται και το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας. Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι τα ηλεκτρικά λεωφορεία θα έχουν επαρκή ενέργεια για να εκτελέσουν τα ταξίδια αναζητείται ο ελάχιστος αριθμός παντογράφων όπου θα λαμβάνουν σύντομη φόρτιση την ώρα που εκτελούν δρομολόγιο, και η τοποθεσία τους. Με αυτή τη μέθοδο φόρτισης, ελαχιστοποιείται ο αριθμός των απαιτούμενων οχημάτων καθώς αξιοποιούνται όλα στη διάρκεια της ημέρας και δεν απαιτείται να επιστρέψουν στην αποθήκη για επαναφόρτιση.

Σύνολα	
S	Σύνολο στάσεων στο δίκτυο
S_t	Σύνολο στάσεων που εξυπηρετούνται από ταξίδι t
L	Σύνολο γραμμών
K	Σύνολα διαθέσιμων οχημάτων
T	Σύνολο ταξιδιών
Φ_k	Ταξινομημένο σύνολο ταξιδιών που εκτελούνται από όχημα $k \in K$
Παράμετροι	
SoC_{min}	Ελάχιστο επιτρεπτό επίπεδο μπαταρίας
e	Η ενέργεια που δέχεται το όχημα όταν φορτίζει στον παντογράφο
\tilde{e}	Η ενέργεια που δέχεται το όχημα ανά λεπτό όταν φορτίζει στον παντογράφο σε τερματικό σταθμό
SoC_{max}	Μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο μπαταρίας
λ_t	Το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ταξίδι $t \in T$ παραμένει στον τερματικό σταθμό προτού ξεκινήσει το επόμενο ταξίδι
ζ	Ο ρυθμός κατανάλωσης της ενέργεια για ταξίδι t και απόσταση από στάση s σε s+1, όπου $s \in S_t$ και $t \in T$
η	Η ενέργεια που καταναλώνεται σε τερματικούς σταθμούς σε stand by mode (air condition, θέρμανση)
d_j	Η απόσταση από στάση s σε s+1, όπου $s \in S$

b_s Το κόστος εγκατάστασης παντογράφου σε στάση $s \in S$

Μεταβλητές

x_j	Δυαδική μεταβλητή, όπου $x_j = 1$ αν τοποθετηθεί παντογράφος στη στάση $s \in S$
SoC_t^s	Η κατάσταση φόρτισης του οχήματος σε ταξίδι $t \in T$ όταν διέρχεται από τη στάση $s \in S$

Πίνακας 3.1 Συμβολισμοί

Αντικειμενική Συνάρτηση:

$$\min \sum_{j \in S} x_j \cdot b \quad (1)$$

Περιορισμοί:

$$SoC_{i,j} = SoC_{i,j-1} - \zeta \cdot d_{j-1} + e \cdot x_j, \forall i \in T, \forall j \in S_t \quad (2)$$

$$SoC_{i,j} - x_j \cdot e \geq SoC_{min}, \forall i \in T, \forall j \in S_t \quad (3)$$

$$SoC_{i,j} \leq SoC_{max}, \forall i \in T, \forall j \in S_t \quad (4)$$

$$SoC_{i,j} \geq SoC_{min} + \zeta \cdot d_j, \forall i \in T, \forall j \in S_t \quad (5)$$

$$SoC_{\Phi_{k,1}}^{S_{\Phi_{k,1}}^1} = SoC_{max}, \forall k \in K \quad (6)$$

$$SoC_{\Phi_{k,n}}^{S_{\Phi_{k,n}}^1} = SoC_{\Phi_{k,n-1}}^{S_{\Phi_{k,n-1}}^n} + \tilde{e} \cdot x_{S_{\Phi_{k,n-1}}} \cdot \lambda_{\Phi_{k,n-1}} - \lambda_{\Phi_{k,n-1}} \cdot \eta, \forall k \in K, \forall n_t \in \Phi_k \setminus \{\Phi_{k,1}\}$$

(7)

Η αντικειμενική συνάρτηση $\sum_{j \in S} x_j \cdot b$ (1) εκφράζει το άθροισμα του γινομένου των παντογράφων, που θα τοποθετηθούν τελικά σε στάσεις $s \in S$ του εξεταζόμενου δικτύου, επί το κόστος εγκατάστασης τους. Σκοπός της αντικειμενικής συνάρτησης είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους, τοποθετώντας τον ελάχιστο δυνατό αριθμό παντογράφων στις στάσεις του δικτύου, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία των ηλεκτρικών λεωφορείων των γραμμών που εξετάζονται στο παρόν πρόβλημα.

Η εξίσωση (2) διασφαλίζει ότι το όχημα, όταν εκτελεί ταξίδι $t \in T$ και βρίσκεται σε στάση $s \in S_t$, για όλες τις στάσεις εκτός από την πρώτη, θα έχει επίπεδο φόρτισης ίσο με αυτό που είχε στην προηγούμενη στάση $s-1$ αν αφαιρέσουμε την ενέργεια που κατανάλωσε από την προηγούμενη στάση και προσθέσουμε την ενέργεια που έλαβε σε περίπτωση που έχει τοποθετηθεί παντογράφος εκεί. Η ενέργεια που κατανάλωσε από την προηγούμενη στάση προκύπτει ως το γινόμενο της απόστασης επί τον ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας ζ .

Σύμφωνα με την (3) κανένα όχημα που εκτελεί ταξίδι $t \in T$ και φεύγει από στάση $s \in S_t$ δεν μπορεί να έχει επίπεδο φόρτισης μικρότερο από το $SO C_{min}$ είτε λάβει ενέργεια από τον παντογράφο σε περίπτωση που έχει τοποθετηθεί εκεί είτε όχι.

Αντίστοιχα, θα πρέπει τα οχήματα να μην υπερβαίνουν το μέγιστον δυνατό επίπεδο φόρτισης σε οποιαδήποτε στάση $s \in S_t$ και σε οποιοδήποτε ταξίδι $t \in T$, κάτι που εκφράζεται από τον περιορισμό (4).

Ο περιορισμός (5) διασφαλίζει ότι κανένα όχημα δεν μπορεί να μετακινηθεί από μία στάση στην επόμενη εάν το επίπεδο φόρτισης του δεν επαρκεί. Συνεπώς, η κατάσταση φόρτισης ενός ταξιδιού $t \in T$ σε μία στάση $s \in S_t$ θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση από το ελάχιστο απαιτούμενο επίπεδο ενέργειας εάν προστεθεί σε αυτό ή απαιτούμενη ποσότητα ενέργειας ώστε να φτάσει στην επόμενη στάση.

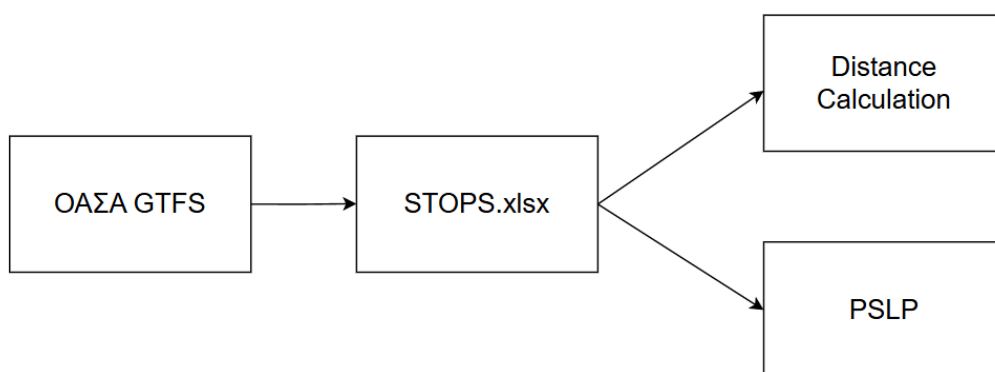
Επίσης, τα οχήματα θα πρέπει να ξεκινούν το πρώτο τους ταξίδι με πλήρως φορτισμένη μπαταρία. Η εξίσωση (6) δείχνει ότι το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας για κάθε όχημα $k \in K$ στην πρώτη στάση του πρώτου ταξιδιού θα πρέπει να είναι $SO C_{max}$.

Ο χρόνος παραμονής των οχημάτων σε τερματικούς σταθμούς και κατά συνέπεια η φόρτιση που λαβαίνουν εκεί δεν είναι σταθερά καθώς εξαρτώνται από τους χρόνους έναρξης των δρομολογίων που εκτελούν αυτά. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητος ο περιορισμός (7). Αυτός ορίζει ότι τα οχήματα $k \in K$ σε κάθε ταξίδι $\eta_t \in \Phi_k \setminus \{\Phi_{k,1}\}$ θα έχουν στην πρώτη στάση επίπεδο φόρτισης ίσο με το επίπεδο φόρτισης στην προηγούμενη στάση (του προηγούμενου ταξιδιού) συν την ενέργεια ανά δευτερόλεπτο που λαμβάνουν από τον παντογράφο σε περίπτωση που έχει τοποθετηθεί εκεί επί τον χρόνο παραμονής στη στάση για φόρτιση μείον τον χρόνο παραμονής στη στάση επί την ενέργεια που καταναλώνεται στην αδράνεια για λειτουργίες όπως θέρμανση, air condition κλπ. Παράλληλα, το επίπεδο ενέργειας δεν μπορεί ποτέ να ξεπεράσει το μέγιστο επιτρεπτό, $SO C_{max}$.

4. Συλλογή Στοιχείων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία συλλογής δεδομένων για τις λεωφορειακές γραμμές 021 Πλατεία Κάνιγγος – Γκύζη, στην 022 Ακαδημία – Νέα Κυψέλη, 025 Ιπποκράτους – Προφήτη Δανιήλ και 026 Ιπποκράτους – Βοτανικός. Σύμφωνα με το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 3, για να διασφαλιστεί ότι η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας των ηλεκτρικών λεωφορείων καθ' όλη τη διάρκεια των ταξιδιών θα είναι στα επιθυμητά όρια μεταξύ SoC_{min} και SoC_{max} , πρέπει να υπολογιστεί η ενέργεια που καταναλώνει το λεωφορείο κατά την μετακίνηση από τη μια στάση στην επόμενη [βλ. Περιορισμούς (1), (4)]. Με βάση την διαθέσιμη βιβλιογραφία, η παράμετρος ζ που εκφράζει τον ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας (kWh/km) εκτιμήθηκε 0,82 που είναι μια λογική ενδεικτική τιμή. Ωστόσο, ήταν αναγκαίο να γνωρίζουμε τις αποστάσεις μεταξύ των στάσεων ώστε να βρεθεί με ακρίβεια η ενέργεια που ξοδεύεται.

Ως πηγή δεδομένων, επιλέγονται τα δεδομένα GTFS (General Transit Feed Specification) του ΟΑΣΑ, ένα σύνολο αρχείων σε μορφή CSV που περιγράφουν το δίκτυο δημόσιων συγκοινωνιών της Αθήνας. Από τα δεδομένα GTFS αντλήθηκαν οι στάσεις και οι συντεταγμένες τους, τις οποίες εξάγαμε και επεξεργαστήκαμε κατάλληλα. Έτσι δημιουργήσαμε το αρχείο STOPS.xlsx, τα στοιχεία του οποίου παρουσιάζονται στους πίνακες 4.1, 4.2, 4.3 και 4.4 για τις γραμμές 021, 022, 025 και 026 αντίστοιχα. Το αρχείο distance_calculation.py διαβάζει τα δεδομένα για τις συντεταγμένες των στάσεων από το excel και υπολογίζει τις απαιτούμενες αποστάσεις. Έπειτα, το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο αρχείο pslp.py χρησιμοποιεί τις αποστάσεις μεταξύ των στάσεων ώστε να υπολογίσει με ακρίβεια την ενέργεια που καταναλώνεται στην διαδρομή και το επίπεδο της μπαταρίας σε αυτές. Με αυτόν τον τρόπο το μοντέλο αναζητά τις βέλτιστες θέσεις στις οποίες πρέπει να τοποθετηθούν παντογράφοι ώστε η μπαταρία να βρίσκεται πάντα στα επιτρεπτά όρια με το ελάχιστο κόστος.



Διάγραμμα 4.1 Αρχεία και ροή δεδομένων για τη δομή του μοντέλου

021- ΠΛΑΤΕΙΑ ΚΑΝΝΙΓΓΟΣ-ΓΚΥΖΗ	Χ	Υ
18 ΠΛ. ΚΑΝΙΓΓΟΣ	37,9856600	23,7311300
060010 ΝΑΥΑΡΙΝΟΥ	37,9837048	23,7349122
060011 ΑΡΑΧΩΒΗΣ	37,9849398	23,7374186
060012 ΚΑΛΛΙΔΡΟΜΙΟΥ	37,9859110	23,7392359
060013 ΤΣΙΜΙΣΚΗ	37,9869527	23,74118634
060014 ΛΑΣΚΑΡΕΩΣ	37,9884026	23,7439909
060017 ΑΓ. ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ	37,9909293	23,7465462
060018 ΜΟΜΦΕΡΑΤΟΥ	37,9906755	23,7479147
060019 ΣΚΑΛΑΚΙΑ	37,9925399	23,7489778
060020 ΠΛ. ΓΚΥΖΗ	37,9935778	23,74931537
060021 ΣΚΑΛΑΚΙΑ	37,9920210	23,7485723
060022 ΜΟΜΦΕΡΑΤΟΥ	37,9909207	23,7482344
060023 ΠΑΡΑΣΧΟΥ	37,9899376	23,7479189
060024 ΙΠΠΟΚΡΑΤΟΥΣ (ΑΦΕΤΗΡΙΑ)	37,9884301	23,7468308
060666 ΛΑΣΚΑΡΕΩΣ	37,9869545	23,7437954
060667 ΤΣΙΜΙΣΚΗ	37,9859948	23,7418287
060668 ΚΑΛΛΙΔΡΟΜΙΟΥ	37,9847817	23,7394074
061109 ΔΙΔΟΤΟΥ	37,9835505	23,7369407
060767 ΣΟΛΩΝΟΣ	37,9826814	23,735213
060030 ΖΩΟΔΟΧΟΣ ΠΗΓΗ	37,9843568	23,733688
060031 ΜΠΟΤΑΣΗ	37,9855885	23,7326812
18 ΠΛ. ΚΑΝΙΓΓΟΣ	37,9856600	23,73113

Πίνακας 4.1 Οι συντεταγμένες Χ και Υ των στάσεων της γραμμής 021

022-ΑΚΑΔΗΜΙΑ-Ν.ΚΥΨΕΛΗ	X	Y
91 ΑΦΕΤΗΡΙΑ - ΣΙΝΑ	37,9800830	23,734821
061000 ΑΚΑΔΗΜΙΑ	37,9798734	23,7335091
060116 ΡΕΞ	37,9827260	23,7310565
060118 ΠΛ. ΛΑΥΡΙΟΥ	37,9858267	23,7285925
060065 ΠΑΤΗΣΙΩΝ	37,9900089	23,73032
060066 ΑΙΓΥΠΤΟΥ	37,9910421	23,7322183
060550 ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟΣ	37,9941861	23,733133
060551 ΕΠΤΑΝΗΣΟΥ	37,9961709	23,7352559
060552 ΙΘΑΚΗΣ	37,9976955	23,7373941
060553 ΖΑΚΥΝΘΟΥ	37,9994663	23,7389319
060554 ΣΚΥΡΟΥ	38,0010166	23,7406598
060555 ΠΛ ΚΥΨΕΛΗΣ (ΤΕΡΜΑ 036)	38,0023813	23,7420444
060556 ΦΙΛΟΤΙΜΟΥ	38,0020239	23,7437771
060558 ΚΟΛΟΣΣΑΙΟΝ	38,0029801	23,7441838
061360 ΠΛ. ΚΥΨΕΛΗΣ	38,0024120	23,74156602
060560 ΣΚΥΡΟΥ	38,0006996	23,7399433
060561 ΖΑΚΥΝΘΟΥ	37,9993175	23,7385017
060562 ΙΘΑΚΗΣ	37,9978366	23,7372541
060563 ΕΠΤΑΝΗΣΟΥ	37,9961730	23,7350393
060565 ΟΤΕ ΠΕΔΙΟΥ ΑΡΕΩΣ	37,9933931	23,7315751
061011 ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ	37,9884693	23,7303264
060985 ΠΛ. ΚΑΝΙΓΓΟΣ	37,9854204	23,7310317
060008 ΖΩΟΔ.ΠΗΓΗ	37,9835545	23,7325977
060580 ΑΦΕΤΗΡΙΑ - ΑΚΑΔΗΜΙΑ	37,9807965	23,734699
91 ΑΦΕΤΗΡΙΑ - ΣΙΝΑ	37,9800830	23,734821

Πίνακας 4.2 Οι συντεταγμένες X και Y των στάσεων της γραμμής 022

025 ΙΠΠΟΚΡΑΤΟΥΣ - ΠΡΟΦ. ΔΑΝΙΗΛ	Χ	Υ
22 ΙΠΠΟΚΡΑΤΟΥΣ	37,9884301	23,7468308
060666 ΛΑΣΚΑΡΕΩΣ	37,9869545	23,7437954
060667 ΤΣΙΜΙΣΚΗ	37,9859948	23,7418287
060668 ΚΑΛΛΙΔΡΟΜΙΟΥ	37,9847817	23,7394074
061109 ΔΙΔΟΤΟΥ	37,9835505	23,7369407
060869 ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ	37,9808778	23,7347412
061261 ΟΜΗΡΟΥ	37,9791209	23,7350436
060718 ΣΥΝΤΑΓΜΑ	37,9753245	23,7338527
060795 ΜΗΤΡΟΠΟΛΗ	37,9755825	23,7302172
060970 ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ	37,9767674	23,7266718
060341 ΣΤ. ΗΣΑΠ ΘΗΣΕΙΟ	37,9773953	23,7215229
060342 ΠΛ. ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ	37,9807646	23,7208952
060343 ΙΚΑ	37,9818084	23,7201739
060243 ΑΧΙΛΛΕΩΣ	37,9846951	23,7174869
060245 ΣΠΥΡΟΥ ΠΑΤΣΗ	37,9854185	23,7110616
060246 ΣΧΟΛΕΙΟ	37,9875263	23,7105522
23 ΠΡΟΦΗΤΗ ΔΑΝΙΗΛ	37,9892855	23,708955
23 ΠΡΟΦΗΤΗ ΔΑΝΙΗΛ	37,9892855	23,708955
060248 ΣΧΟΛΕΙΟ	37,9875327	23,7102297
060261 ΣΠ. ΠΑΤΣΗ	37,9847972	23,7112918
060263 ΘΕΡΜΟΠΥΛΩΝ	37,9838817	23,7165449
060359 ΛΕΩΝΙΔΟΥ	37,9816683	23,7181134
060361 ΠΕΙΡΑΙΩΣ	37,9797969	23,7194984
060362 ΑΓ. ΑΣΩΜΑΤΟΙ	37,9782765	23,7206542
060410 ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ	37,9767401	23,7254378
060411 ΒΟΡΕΟΥ	37,9776075	23,7264956
060412 ΑΓΟΡΑ	37,9796974	23,7269911
060968 ΕΥΡΙΠΙΔΟΥ	37,9795835	23,7284263
060935 ΚΛΑΥΘΜΩΝΟΣ	37,9798548	23,7312764
061335 ΕΟΤ	37,9775867	23,7341496
061000 ΑΚΑΔΗΜΙΑ	37,9798734	23,7335091
060658 ΣΟΛΩΝΟΣ	37,9818521	23,735159
060659 ΔΙΔΟΤΟΥ	37,9826938	23,7367388
060660 ΑΓ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ	37,9835993	23,7386258
060661 ΚΑΛΛΙΔΡΟΜΙΟΥ	37,9848396	23,7411381
060662 ΤΣΙΜΙΣΚΗ	37,9860707	23,7435821
060663 ΛΑΣΚΑΡΕΩΣ	37,9865866	23,744571
060664 ΔΙΓΕΝΗ ΑΚΡΙΤΑ	37,987374	23,7460829
22 ΙΠΠΟΚΡΑΤΟΥΣ	37,988318	23,747525

Πίνακας 4.3 Οι συντεταγμένες Χ και Υ των στάσεων της γραμμής 025

026 ΙΠΠΟΚΡΑΤΟΥΣ - ΒΟΤΑΝΙΚΟΣ	X	Y
22 ΙΠΠΟΚΡΑΤΟΥΣ	37,9884301	23,7468308
060666 ΛΑΣΚΑΡΕΩΣ	37,9869545	23,7437954
060667 ΤΣΙΜΙΣΚΗ	37,9859948	23,7418287
060668 ΚΑΛΛΙΔΡΟΜΙΟΥ	37,9847817	23,7394074
061109 ΔΙΔΟΤΟΥ	37,9835505	23,7369407
060869 ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ	37,9808778	23,7347412
061261 ΟΜΗΡΟΥ	37,9791209	23,7350436
060718 ΣΥΝΤΑΓΜΑ	37,9753245	23,7338527
060795 ΜΗΤΡΟΠΟΛΗ	37,9755825	23,7302172
060970 ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ	37,9767674	23,7266718
060341 ΣΤ. ΗΣΑΠ ΘΗΣΕΙΟ	37,9773953	23,7215229
060342 ΠΛ. ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ	37,9807646	23,7208952
060343 ΙΚΑ	37,9818084	23,7201739
060345 ΜΑΡΑΘΩΝΟΣ	37,9824083	23,7185091
060346 ΣΑΛΑΜΙΝΟΣ	37,9818916	23,7173041
060347 ΜΥΚΑΛΗΣ	37,9808946	23,714985
060315 ΣΙΔΕΡΑ	37,9806188	23,7127429
060327 ΣΠΥΡΟΥ ΠΑΤΣΗ	37,9815326	23,7086689
060328 ΑΓ. ΜΑΡΚΕΛΑ	37,9796236	23,7075317
060979 ΚΟΖΑΝΗΣ	37,9777102	23,7064576
060977 ΛΑΓΚΑΔΑ	37,9778218	23,7042596
24 ΒΟΤΑΝΙΚΟΣ	37,981483	23,7041245
24 ΒΟΤΑΝΙΚΟΣ	37,981483	23,7041245
060329 ΚΟΖΑΝΗΣ	37,977952	23,7058417
060339 ΑΓ. ΜΑΡΚΕΛΑ	37,9803287	23,7083829
061218 ΣΠ. ΠΑΤΣΗ	37,9812973	23,7100985
060357 ΛΑΙΣ	37,9811978	23,7136516
060358 ΠΛΑΤΑΙΩΝ	37,9822039	23,7159592
060359 ΛΕΩΝΙΔΟΥ	37,9816683	23,7181134
060361 ΠΕΙΡΑΙΩΣ	37,9797969	23,7194984
060362 ΑΓ. ΑΣΩΜΑΤΟΙ	37,9782765	23,7206542
060410 ΜΟΝΑΣΤΗΡΑΚΙ	37,9767401	23,7254378
060411 ΒΟΡΕΟΥ	37,9776075	23,7264956
060412 ΑΓΟΡΑ	37,9796974	23,7269911
060968 ΕΥΡΙΠΙΔΟΥ	37,9795835	23,7284263
060935 ΚΛΑΥΘΜΩΝΟΣ	37,9798548	23,7312764
061335 ΕΟΤ	37,9775867	23,7341496
061000 ΑΚΑΔΗΜΙΑ	37,9798734	23,7335091
060658 ΣΟΛΩΝΟΣ	37,9818521	23,735159
060659 ΔΙΔΟΤΟΥ	37,9826938	23,7367388
060660 ΑΓ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ	37,9835993	23,7386258
060661 ΚΑΛΛΙΔΡΟΜΙΟΥ	37,9848396	23,7411381
060662 ΤΣΙΜΙΣΚΗ	37,9860707	23,7435821
060663 ΛΑΣΚΑΡΕΩΣ	37,9865866	23,744571
060664 ΔΙΓΕΝΗ ΑΚΡΙΤΑ	37,987374	23,7460829
22 ΙΠΠΟΚΡΑΤΟΥΣ	37,9884301	23,7468308

Πίνακας 4.4 Οι συντεταγμένες X και Y των στάσεων της γραμμής 026

Επιπλέον, από την επίσημη τον ΟΑΣΑ, αντλήθηκαν πραγματικά στοιχεία για την λειτουργία των γραμμών. Τα στοιχεία αυτά περιλαμβάνουν τον αριθμό των στάσεων, τα ταξίδια που πραγματοποιούν καθημερινά, τα οχήματα που τα εκτελούν καθώς και τον αριθμό των ταξιδιών που εκτελεί το κάθε όχημα. Αυτά παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.5 και 4.6.

Γραμμή (l)	Στάσεις (s)	Ταξίδια (t)	Οχήματα (k)
021	22	60	2
022	25	70	3
025	39	72	3
026	46	74	4
Σύνολο	132	276	12

Πίνακας 4.5 Χαρακτηριστικά των γραμμών 021, 022, 025 και 026

Όχημα	Ταξίδια
1	1 - 24
2	25 - 48
3	49 - 72
4	73 - 90
5	91 - 108
6	109 - 127
7	128 – 146
8	147-176
9	177-206
10	207-229
11	230-253
12	254-276

Πίνακας 4.6 Ταξίδια που εκτελούν τα οχήματα

5. Εφαρμογή και Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου για την επίλυση του Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προβλήματος (MILP) τοποθέτησης παντογράφων σε ένα συγκοινωνιακό δίκτυο με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους. Πιο συγκεκριμένα, θα γίνει εφαρμογή αυτού του μοντέλου σε τέσσερις λεωφορειακές γραμμές της Αθήνας, στην 021 Πλατεία Κάνιγγος – Γκύζη, στην 022 Ακαδημία – Νέα Κυψέλη, στην 025 Ιπποκράτους – Προφήτη Δανιήλ και στην 026 Ιπποκράτους – Βοτανικός για τις οποίες αναφέρεται η διαδικασία συλλογής στοιχείων στο κεφάλαιο 4.

Η επίλυση πραγματοποιήθηκε σε Python 3.13 (64-bit), χρησιμοποιώντας το Gurobi Optimizer 12.0.1 build v12.0.1rc0 ως solver βελτιστοποίησης σε υπολογιστή με επεξεργαστή AMD Ryzen 3 3250U with Radeon Graphics (2.60 GHz) και 8 GB RAM και ο χρόνος επίλυσης προέκυψε 0,93 δευτερόλεπτα. Το πρόβλημα διατυπώνεται με δυαδικές μεταβλητές για την εγκατάσταση παντογράφων και συνεχείς μεταβλητές για την κατάσταση φόρτισης των οχημάτων (SoC), ενώ η αντικειμενική συνάρτηση στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους εγκατάστασης. Το Gurobi επιλύει το πρόβλημα μέσω της μεθόδου Branch and Cut, η οποία συνδυάζει τη διακλάδωση υποπροβλημάτων (branching) με την προσθήκη περιορισμών (cutting planes) για την αποδοτική εξάλειψη μη ακέραιων λύσεων.

Ως πρώτο βήμα χρειάζεται να βρεθούν με ακρίβεια οι αποστάσεις μεταξύ των διαδοχικών στάσεων. Για αυτό, στο αρχείο `distance_calculation.py` φορτώνεται το `STOPS.xlsx` που περιέχει τις συντεταγμένες των στάσεων που αντλήθηκαν από το GTFS και χρησιμοποιείται ο τύπος Haversine, ο οποίος υπολογίζει την απόσταση μεταξύ δύο σημείων στη γη, λαμβάνοντας υπόψιν την καμπυλότητα της γης. Η απόσταση προκύπτει ως εξής;

$$d = 2 \cdot r \cdot \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos(\phi_1) \cdot \cos(\phi_2) \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right)$$

Όπου:

ϕ_1, ϕ_2 : γεωγραφικά πλάτη

λ_1, λ_2 : γεωγραφικά μήκη

$r = 6371$ km: η ακτίνα της Γης

Οι αποστάσεις αποθηκεύονται σε μια λίστα και επιστρέφονται για περαιτέρω ανάλυση.

Έπειτα, στον κύριο κώδικα `pslr.py` επιλύεται το μοντέλο βελτιστοποίησης.

Για τις μπαταρίες και τις συνθήκες φόρτισης ορίσαμε τις τιμές που θα χρησιμοποιήσουμε στο μοντέλο με βάση τη δημοσιευμένη βιβλιογραφία και κάναμε λογικές εκτιμήσεις.

Τα ηλεκτρικά λεωφορεία επιλέχθηκε ότι θα έχουν μπαταρία Διοξειδίου του Λιθίου-Τιτανίου (Lithium-Titanate Oxide - LTO) 80 kWh (Mohammad Shadnam Zarbil, 2022) καθώς

μπορεί να δεχτεί μεγάλα ποσά ενέργειας κατά την φόρτιση, είναι ανθεκτική στη διακύμανση θερμοκρασίας και έχει μεγάλη διάρκεια ζωής. Η ελάχιστη επιτρεπτή κατάσταση μπαταρίας SoC_{min} δίνεται ως 25% του 80 για αυτό την λάβαμε 20 KWh, ενώ η μέγιστη επιτρεπτή κατάσταση SoC_{max} ορίστηκε 72 KWh.

Με βάση την εφαρμογή που έγινε στη Γενεύη (**Isabel Carrilero, 2018**), επιλέξαμε στις ενδιαμέσες στάσεις, οι παντογράφοι που θα τοποθετηθούν να έχουν ισχύ 600 kW και η διάρκεια φόρτισης θεωρείται σταθερή και ίση με 20 δευτερόλεπτα, που είναι ένας λογικός χρόνος αποβίβασης-επιβίβασης χωρίς να υπάρξουν καθυστερήσεις. Συνεπώς η ενέργεια που λαμβάνει το λεωφορείο από τον παντογράφο στις ενδιαμέσες στάσεις είναι $e = 3,33$ KWh. Στους τερματικούς σταθμούς, τοποθετούνται παντογράφοι ισχύος 400 kW ενώ ο χρόνος παραμονής των λεωφορείων στην στάση δεν είναι γνωστός. Επομένως, κάναμε μια λογική εκτίμηση ότι ο χρόνος παραμονής στους τερματικούς σταθμούς κυμαίνεται μεταξύ 1-3 λεπτών και δεδομένου ότι σε εκείνες τις στάσεις ο ρυθμός φόρτισης είναι $\tilde{e} = 6,67$ KWh/λεπτό, υπολογίζεται η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας.

Με βάση την (**Gkiotsalitis et al., 2025**) έγινε η παραδοχή ότι κατά την διάρκεια των ταξιδιών τα λεωφορεία καταναλώνουν $\zeta = 0,82$ KWh/χιλιόμετρο και στους τερματικούς σταθμούς σε κατάσταση παραμονής σε τερματικό σταθμό, καταναλώνονται $\eta = 0,01$ KWh/λεπτό για τις ανάγκες θέρμανσης, ψύξης κλπ .

Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα, υπολογίστηκε σε κάθε στάση το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας και διερευνήθηκε η βέλτιστη τοποθεσία παντογράφων για οπορτουμιστική φόρτιση ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των απαιτούμενων υποδομών, ενώ τα λεωφορεία μπορούν να εκτελούν δρομολόγια απρόσκοπτα. Το αποτέλεσμα που προέκυψε είναι ότι για τις ανάγκες του συγκεκριμένου δικτύου θα χρειαστεί να τοποθετηθούν παντογράφοι σε 6 στάσεις, κάποιες εκ των οποίων χρησιμοποιούνται από περισσότερες από μία λεωφορειακές γραμμές. Πιο συγκεκριμένα θα τοποθετηθούν παντογράφοι στις ενδιαμέσες στάσεις:

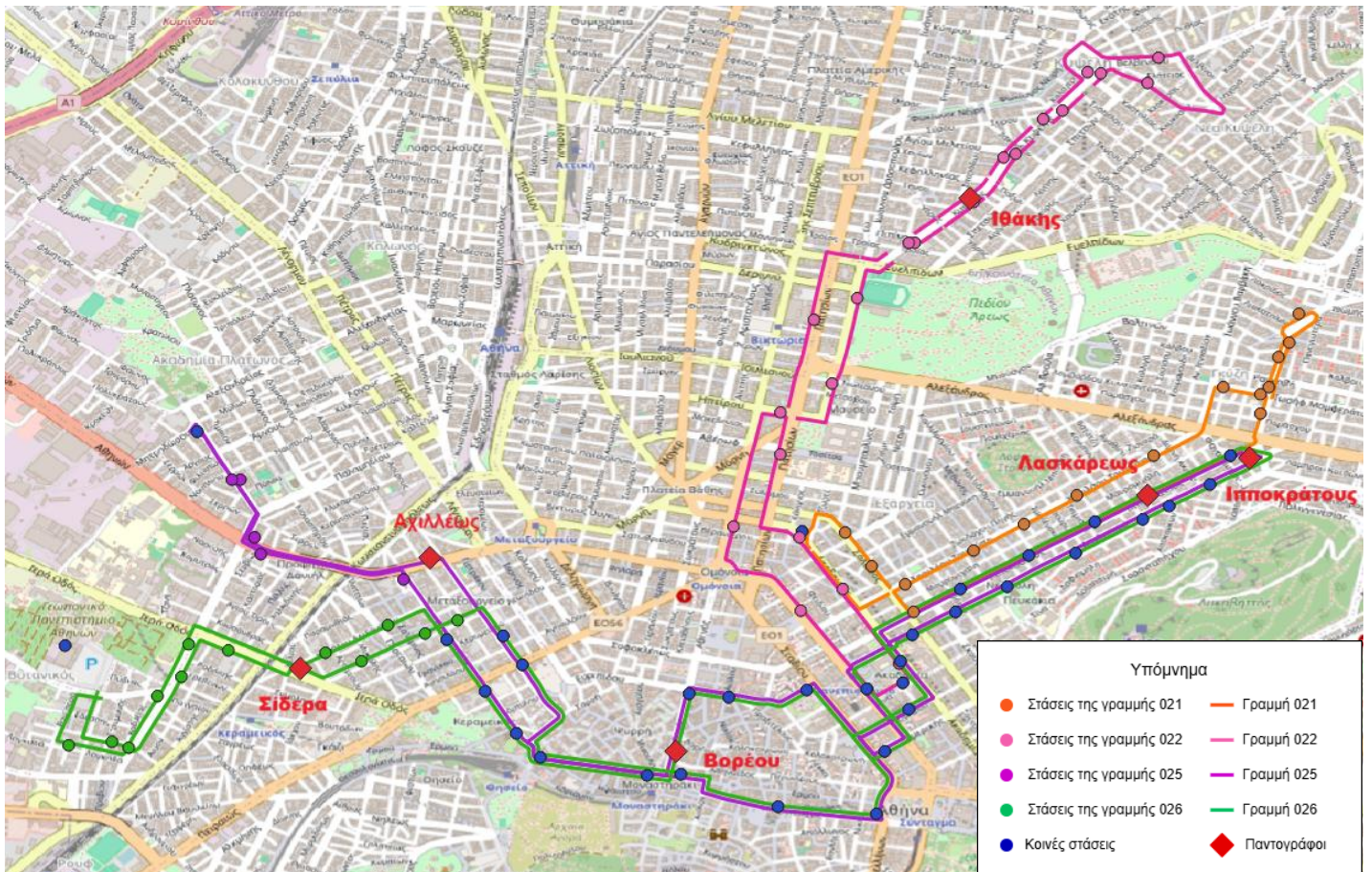
- 'Ιθάκης' της γραμμής 022
- 'Αχιλλέως' της γραμμής 025
- 'Σίδερα' της γραμμής 026

Επιπλέον, θα τοποθετηθούν παντογράφοι στις κοινόχρηστες στάσεις:

- 'Λασκάρεως' των γραμμών 021, 025, 026
- 'Βορέου' των γραμμών 025, 026
- 'Ίπποκράτους' των γραμμών 025, 026

Σύμφωνα με την (**Bloomberg New Energy Finance, 2018**) θεωρούμε το κόστος αγοράς και βασικής εγκατάστασης ενός παντογράφου 200.000€. Συνεπώς από την αντικειμενική συνάρτηση $\min \sum_{j \in S} x_j \cdot b_j$, προκύπτει ότι το κόστος εγκατάστασης των παντογράφων ανέρχεται σε 1.200.000 €.

Ο Χάρτης 5.1 τον οποίο δημιουργήσαμε στο QGIS 3.40.0 ‘Bratislava’ με την χρήση των GTFS δεδομένων του ΟΑΣΑ αποτυπώνει το συγκοινωνιακό δίκτυο που εξετάσαμε και τις επιλεγμένες τοποθεσίες για τους παντογράφους.



Χάρτης 5.1 Οι λεωφορειακές γραμμές 021, 022, 025 και 026 και οι τοποθεσίες παντογράφων

Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολήθηκε με τη **στρατηγική τοποθέτηση σταθμών οπορτουνιστικής φόρτισης με παντογράφο για τέσσερις λεωφορειακές γραμμές της Αθήνας**. Το ζήτημα αυτό είναι ιδιαίτερα επίκαιρο, δεδομένων των δεσμεύσεων της Ευρωπαϊκής Ένωσης για μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και της ανάγκης για βιώσιμες λύσεις στον αστικό μεταφορικό τομέα. Η έρευνα, με σκοπό την αντιμετώπιση των περιορισμών της φόρτισης στα αμαξοστάσια, όπως το υψηλό κόστος των μεγάλων μπαταριών και η μη αξιοποίηση των οχημάτων κατά τη διάρκεια των ταξιδιών τους για επαναφόρτιση, πρότεινε ως εναλλακτική την οπορτουνιστική φόρτιση κατά τη διάρκεια που εκτελούνται δρομολόγια.

Για την επίτευξη του στόχου αυτού, αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (**MILP**). Το μοντέλο αυτό, τροφοδοτούμενο με **πραγματικά δεδομένα GTFS** από τον ΟΑΣΑ για τις γραμμές 021, 022, 025 και 026, είχε ως στόχο την **ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους εγκατάστασης των παντογράφων**, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι τα ηλεκτρικά λεωφορεία θα διατηρούν **επαρκές επίπεδο ενέργειας (SoC)** για την ολοκλήρωση όλων των ημερήσιων δρομολογίων τους. Οι περιορισμοί του μοντέλου ενσωμάτωσαν τις πραγματικές αποστάσεις μεταξύ των στάσεων, τον ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας, τις δυνατότητες φόρτισης σε τερματικούς και ενδιάμεσους σταθμούς, καθώς και τον έλεγχο της κατάστασης της μπαταρίας σε κάθε στάση.

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης κατέδειξαν ότι οι τέσσερις γραμμές λεωφορείων που εξετάστηκαν μπορούν να λειτουργήσουν απρόσκοπτα με την **τοποθέτηση 6 παντογράφων**, χωρίς να υπάρχει η ανάγκη να επιστρέψουν στο αμαξοστάσιο για φόρτιση. Αυτοί τοποθετούνται στρατηγικά στο δίκτυο στις στάσεις 'Ιθάκη' της γραμμής 022, 'Αχιλλέως' της γραμμής 025, 'Σίδερα' της γραμμής 026, και στις κοινόχρηστες στάσεις 'Λασκάρως' των γραμμών 021, 025, 026, 'Βορέου' των γραμμών 025, 026 και 'Ιπποκράτους' των γραμμών 025, 026. Το γεγονός ότι μέσω βελτιστοποίησης επιλέχθηκαν και ορισμένες κοινόχρηστες στάσεις επιβεβαιώνει τα οφέλη του συντονισμένου σχεδιασμού σε επίπεδο δικτύου έναντι της ανεξάρτητης ανάλυσης ανά γραμμή. Η **κοινή χρήση της υποδομής** οδηγεί σε σημαντική μείωση του συνολικού κόστους, παρέχοντας μια οικονομικά αποδοτική λύση για τους φορείς λήψης αποφάσεων.

Η παρούσα μελέτη ανοίγει το πεδίο έρευνας για σημαντικές και ποικίλες κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας. Αρχικά, η **εφαρμογή του μοντέλου σε ένα ευρύτερο τμήμα** του λεωφορειακού δικτύου της Αθήνας θα μπορούσε να είναι ωφέλιμη, ώστε να αξιολογηθεί η βελτιστοποίηση της υποδομής φόρτισης για πολλαπλές γραμμές με διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά. Επίσης, μια **συγκριτική οικονομική μελέτη** μεταξύ της οπορτουνιστικής φόρτισης, της φόρτισης στο αμαξοστάσιο και άλλων τεχνολογιών (π.χ. αλλαγής μπαταρίας) αναμφίβολα θα πρόσφερε μια ολοκληρωμένη εικόνα του πιο αποδοτικού συνδυασμού. Ιδιαίτερη σημασία έχει και η **ενσωμάτωση παραγόντων αβεβαιότητας** στο μοντέλο, όπως οι διακυμάνσεις στη ζήτηση των επιβατών που επηρεάζουν τους χρόνους παραμονής στις

στάσεις, καθώς και η μεταβλητότητα στην πραγματική κατανάλωση ενέργειας λόγω κυκλοφοριακών συνθηκών. Η **ανάπτυξη στοχαστικών ή robust μοντέλων** θα ενίσχυε την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και την δυνατότητα εφαρμογής τους σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- Amir Abbas Darvish Pour, E. Y. S. S. M. N. R. A. (2024). *Investigating the Effects of Fast Charging and Flash Charging Protocols on Battery Health and Economic Viability in Electric Buses*. Retrieved from <https://www.preprints.org/manuscript/202407.0212>
- Arbelaez, A., & Climent, L. (2020). *Transition to eBuses with Minimal Timetable Disruptions*. Retrieved from <https://www.buseireann.ie>.
- Bálint Csonka, M. B. (2023). *Terminal charging scheduling of battery electric buses based on vehicle routing problem*. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/10146217>
- Bi, X., Wang, R., Ye, H., Hu, Q., Bu, S., & Chung, E. (2023). Real-time Scheduling of Electric Bus Flash Charging at Intermediate Stops: A Deep Reinforcement Learning Approach. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. <https://doi.org/10.1109/TTE.2023.3343810>
- Bloomberg New Energy Finance. (2018). *Electric Buses in Cities Driving Towards Cleaner Air and Lower CO 2 Electric Buses in Cities*. Retrieved from https://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2018/04/1726_BNEF_C40_Electric_buses_in_cities_FINAL_APPR_OVED_2.original.pdf
- Daniel Eustace. (n.d.). Opportunity Charging for EV Buses – Pantograph Technology. Retrieved February 14, 2025, from <https://www.vev.com/blog/opportunity-charging-for-ev-buses-pantograph-technology/>
- Editorial Board EVBoosters. (2024). A deep dive into electric bus charging modes. Retrieved December 10, 2024, from <https://evboosters.com/ev-charging-news/a-deep-dive-into-electric-bus-charging-modes/>
- European Alternative Fuels Observatory. (2024, August). *Intercity Electric Buses: Current Landscape and Future Prospects in Europe*. Retrieved from <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/general-information/news/intercity-electric-buses-current-landscape-and-future-prospects-europe>
- European Parliament, P. R. (2024, April). *MEPs adopt stricter CO2 emissions targets for trucks and buses* . Retrieved from https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2024/4/press_release/202404_08IPR20305/20240408IPR20305_en.pdf

- Gkiotsalitis, K., Rizopoulos, D., Merakou, M., Iliopoulou, C., Liu, T., & Cats, O. (2025). Electric bus charging station location selection problem with slow and fast charging. *Applied Energy*, 382, 125242. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2024.125242>
- Hannah Ritchie. (2020). Cars, planes, trains: where do CO₂ emissions from transport come from? *OurWorldinData.Org*. Retrieved from <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport>
- Hao Wu. (2021). *A Survey of Battery Swapping Stations for Electric Vehicles: Operation Modes and Decision Scenarios*. 23(11), 10163–10185. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9613817>
- Hasan, M. M. R. M. E. B. M. H. O. (2020). *Charging Management Strategy using ECOcharging for Electric Bus Fleets in Cities*. 2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2020 - Proceedings. Retrieved from <https://biblio.vub.ac.be/vubirfiles/54786292/PID1254400.pdf>
- Isabel Carrilero, M. G. D. A. J. C. V. J. C. P. G. P. (2018). *Redesigning European Public Transport: Impact of New Battery Technologies in the Design of Electric Bus Fleets*. 195–202. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146518302485>
- Jeongyong KimInho, SongW. , ChoiW. (2015). *An Electric Bus with a Battery Exchange System*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/281730824_An_Electric_Bus_with_a_Battery_Exchange_System
- Jeyup S Kwaak. (2013). Korean Electric Buses Go Wireless. *The Wall Street Journal*. Retrieved from <https://www.wsj.com/articles/BL-KRTB-4052>
- Kun An. (2022). *Battery electric bus infrastructure planning under demand uncertainty*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X18314578>
- Kunith, A., Mendeleevitch, R., & Goehlich, D. (2016). Discussion Papers 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. *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*. In *Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung*.
- Loaiza Quintana, C., Climent, L., & Arbelaez, A. (2022). Iterated Local Search for the eBuses Charging Location Problem. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in*

Bioinformatics), 13399 LNCS, 338–351. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14721-0_24

Matthias Rogge, S. W. D. U. S. (2015). *Fast Charging Battery Buses for the Electrification of Urban Public Transport—A Feasibility Study Focusing on Charging Infrastructure and Energy Storage Requirements*. 4587–4606. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1996-1073/8/5/4587>

Max Molliere. (2024, June 5). *Battery-electric is now the most popular for new city buses in the EU*.

Mohammad Shadnam Zarbil, A. V. H. A. M. P. A. K. (2022). *Design and Sizing of Electric Bus Flash Charger Based on a Flywheel Energy Storage System: A Case Study*. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/21/8032>

Nader El-Taweel, M. M. H. E. Z. F. (2017). *Optimal Design of Charging Stations for Electrified Transit Networks*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/318738176_Optimal_design_of_charging_stations_for_electrified_transit_networks

Nicolas Dirks, M. S. G. W. (2022). *On the integration of battery electric buses into urban bus networks*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X22000730?via%3Dihub>

NZ Transport Agency. (n.d.). Opportunity Charging. Retrieved October 10, 2025, from <https://nzta.govt.nz/walking-cycling-and-public-transport/public-transport/public-transport-framework/integrated-planning-and-design/public-transport-design-guidance/battery-electric-bus-charging/infrastructure-considerations/opportunity-charging>

Picture. (n.d.). Retrieved October 10, 2025, from <https://spectrum.ieee.org/swiss-ebuses-charge-as-fast-as-lightning>

Ruixiao Sun, Q. L. Y. C. (2024). *Optimizing dynamic wireless charging for electric buses: A data-driven approach to infrastructure planning*. 373. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261924012959>

Samarendra Pratap Singh, P. P. S. S. N. S. P. T. (2021). State of charge and health estimation of batteries for electric vehicles applications: key issues and challenges. *Global Energy Interconnection*, 4(2), 145–157. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2021.05.003>

Shaohua Cui, K. G. B. Y. Z. M. A. N. (2023). *Joint optimal vehicle and recharging scheduling for mixed bus fleets under limited chargers*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136655452300323X>

- Wang, X., Song, Z., Xu, H., & Wang, H. (2023). En-route fast charging infrastructure planning and scheduling for battery electric bus systems. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 117, 103659. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2023.103659>
- Wang, Y., Liao, F., & Lu, C. (2022). Integrated optimization of charger deployment and fleet scheduling for battery electric buses. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 109, 103382. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2022.103382>
- Wehres, U., Sharif, S., Yousef, A., Bierlaire, M. M., Verità, M., & Ascona, I. (2016). *Modeling Uncertainty for a Catenary-free Electrical Bus STRC 16 th Swiss Transport Research Conference*. Monte Verità / Ascona. Retrieved from https://strc.ethz.ch/2016/Wehres_EtAl.pdf
- Wenxiang Li, Y. L. H. D. L. B. (2018). *Planning of Electric Public Transport System under Battery Swap Mode*. 10(7). Retrieved from <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/7/2528>
- Xiaoling Luo, W. F. (2023). *Joint design of electric bus transit service and wireless charging facilities*. 174. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554523001023>
- Xylia, M., Leduc, S., Patrizio, P., Kraxner, F., & Silveira, S. (2017). Locating charging infrastructure for electric buses in Stockholm. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 78, 183–200. <https://doi.org/10.1016/J.TRC.2017.03.005>
- Young Jae Jang, S. J. Y. D. K. (2015). *System optimization of the On-Line Electric Vehicle operating in a closed environment*. 80, 222–235. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036083521400429X?via%3Dihub>
- Zeng, Z., Wang, S., & Qu, X. (2023). Consolidating Bus Charger Deployment and Fleet Management for Public Transit Electrification: A Life-Cycle Cost Analysis Framework. *Engineering*, 21, 45–60. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2022.07.019>
- Zhang, A. & L. T. & T. R. & D. C. & C. H. & G. J. & L. Ye. (2021). The Effect of Nonlinear Charging Function and Line Change Constraints on Electric Bus Scheduling. *Promet-Traffic & Transportation*, 33, 527–538.
- Zhaocai Liu, Z. S. Y. H. (2019). Economic Analysis of On-Route Fast Charging for Battery Electric Buses: Case Study in Utah. *Transportation Research Record*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/331997491_Economic_Analysis_of_On-Route_Fast_Charging_for_Battery_Electric_Buses_Case_Study_in_Utah

Βέττας Νίκος, Ν. Η. Κ. Σ. Σ. Σ. Μ. Α. Δ. Σ. (2023). *Προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή: Προκλήσεις και προοπτικές για την ελληνική οικονομία.*

Παράρτημα

Κώδικας distance_calculation.py

```
# Module description: Returns direct distance in meters between two points
from EB-CSLP with D. Rizopoulos

import math
import numpy as np
import openpyxl
import pandas as pd

def main(lat_1, lon_1, lat_2, lon_2):
    """Calculate great-circle distance between two coordinates (in km)."""
    lon_1, lat_1, lon_2, lat_2 = map(math.radians, [lon_1, lat_1, lon_2,
lat_2])
    dlon = lon_2 - lon_1
    dlat = lat_2 - lat_1
    a = math.sin(dlat / 2)**2 + math.cos(lat_1) * math.cos(lat_2) *
math.sin(dlon / 2)**2
    c = 2 * math.asin(math.sqrt(a))
    r = 6371 # Earth's radius in km
    return c * r

def load_data():
    """Load coordinates for all lines and return combined array."""
    dfALL = pd.read_excel("STOPS1.xlsx", sheet_name="ALL", usecols="B:C",
nrows=132)

    # Convert each sheet to numpy arrays
    C_ALL = dfALL.to_numpy()

    return C_ALL

def distances():
    """Compute distances between consecutive stops across all lines."""
    C_ALL = load_data()
    D = []

    for i in range(1, len(C_ALL)):
        dist = main(C_ALL[i - 1][0], C_ALL[i - 1][1], C_ALL[i][0],
C_ALL[i][1])
        D.append(round(dist, 3))

    return D
```

Κώδικας pslp.py

```
## Pantograph Selection Location Problem (PSLP) ##
import gurobipy as gp
from gurobipy import GRB
import sys
import distance_calculation
from distance_calculation import distances

DD = distances()
print("length of list D:", len(DD))
# print("Distances between bus stop:", DD)
D = {}
for i in range(0,39):
    D[i+1]=DD[i]
D[39]=0
for i in range(40,85):
    D[i] = DD[i-2]
D[85]=0
for i in range(86,108):
    D[i] = DD[i-2]
D[108]=0
for i in range(109,132):
    D[i] = DD[i-2]
print(D)
print(len(D))

def main():
    #Sets
    s = 132 # 22 stops for 021, 25 stops for 022, 39 stops for 025 and 46
for 026
    t = 276 # 72 trips for 025 and 74 trips for 026. 60 trips for 021, 70
trips for 022
    k = 12 # 12 vehicles used, 3 for 025 and 4 for 026 according to OASA
data, 2 for 021, 3 for 022
    l = 4 #lines 021, 022, 025 and 026

    #set of stops
    S = [i for i in range(1, s+1)]
    print('SET of bus stops:')
    print(S)
    sys.stdout.write("\n")

    #set of trips
    T = [i for i in range(1, t+1)]
    print('SET of bus trips:')
    print(T)
    sys.stdout.write("\n")

    # Number of trips per line
    t1 = 72 # trips for line 025
    t2 = 74 # trips for line 026
    t3 = 60 # trips for line 021
    t4 = 70 # trips for line 022
```

```

# Define trip ID ranges for each line
T1 = range(1, t1 + 1)
T2 = range(T1.stop, T1.stop + t2) # starts right after t1
T3 = range(T2.stop, T2.stop + t3) # starts after t2
T4 = range(T3.stop, T3.stop + t4) # starts after t3

# Define stops per line
stops_025 = list(range(1, 40)) # stops for line 025
stops_026 = list(range(40, 86)) # stops for line 026
stops_021 = list(range(86, 108)) # stops for line 021
stops_022 = list(range(108, 133)) # stops for line 022

#set of vehicles
K = [i for i in range(1, k+1)]
print('SET of vehicles:')
print(K)
sys.stdout.write("\n")

# Ordered set of performed trips by vehicle k
phi_k = {
    1: list(range(1, 25)),
    2: list(range(25, 49)),
    3: list(range(49, 73)),
    4: list(range(73, 91)),
    5: list(range(91, 109)),
    6: list(range(109, 128)),
    7: list(range(128, 147)),
    8: list(range(147, 177)),
    9: list(range(177, 207)),
    10: list(range(207, 230)),
    11: list(range(230, 254)),
    12: list(range(254, 277)),
}
print('ordered set of performed trips by vehicle k')
print(phi_k)

# Access the ordered trips for vehicle 1
vehicle_1_trips = phi_k[1]
print(f"Vehicle 1 performed trips: {vehicle_1_trips}")
# Access the ordered trips for vehicle 2
vehicle_6_trips = phi_k[6]
print(f"Vehicle 6 performed trips: {vehicle_6_trips}")
sys.stdout.write("\n")
vehicle_10_trips = phi_k[10]
print(f"Vehicle 10 performed trips: {vehicle_10_trips}")
sys.stdout.write("\n")

# Ordered set of stops served by trip t
# Assign stops to trips
S_t1 = {j: stops_025 for j in T1}
S_t2 = {j: stops_026 for j in T2}
S_t3 = {j: stops_021 for j in T3}
S_t4 = {j: stops_022 for j in T4}

# Print summary
print(f"Trips for line 025 (T1): {T1.start}-{T1.stop - 1}")
print(f"Trips for line 026 (T2): {T2.start}-{T2.stop - 1}")
print(f"Trips for line 021 (T3): {T3.start}-{T3.stop - 1}")
print(f"Trips for line 022 (T4): {T4.start}-{T4.stop - 1}")

```

```

S_t = {**S_t1, **S_t2, **S_t3, **S_t4}
print(f"Number of stops for all lines served by trips: {S_t}")

#Parameters
SoC_min = 20 #in kwh
SoC_max = 72 #in kwh
e = 3.3 #in kwh, the energy gained by the pantograph in 20 seconds that
the bus stays in a bus stop
e_tilde = 6.67 #kwh/min, energy supply in terminals
b = 200000
zitta = 0.82 # kWh/km per km, eb-cslp: 0.82
itta = 0.01 # kwh/min energy consumption in terminal in stand by mode
(air condition, heating etc.)

### or generate random numbers for the time that the bus spends at the
terminal
import random
random.seed(1)
time = {}
for i in T:
    for j in S_t[i]:
        for k in K:
            if i != phi_k[k][0]:
                if j == S_t[i][0]:
                    if j not in time:
                        time[i,j] = []
                        random_value = random.randint(1, 3 )
                        time[i,j].append(random_value)
print("Time spend in terminals:", time )

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

#Variables
x = model.addVars(S, vtype=GRB.BINARY, name="X") # 1 if pantograph is
installed in a bus stop, 0 otherwise
SoC = model.addVars(T, S, vtype=GRB.CONTINUOUS, lb=0, ub=SoC_max,
name="SoC") #state of charge of vehicle trip t when departing from bus stop
s

#Objective Function
model.setObjective(sum(x[j] for j in S) * b, GRB.MINIMIZE) #minimizing
the cost by installing the minimum number of pantographs possible

# Constraints
for i in T:
    for j in S_t[i]:
        if j != S_t[i][0] and j != 1:
            model.addConstr(SoC[i,j] == SoC[i, j-1] - zitta * D[j-
1] + e * x[j]) #constraint no.1 indicating that the energy state
# of a trip when leaving the bus stop s is equal to
the energy state of the trip when leaving the previous bus stop s-1
# minus the consumed energy zitta plus the energy e
gained, if a pantograph is installed in bus stop s. If the energy gained
exceeds SoC_max,
# then assign to variable SoC[i,j] = SoC_max

```

```

for i in T:
    for j in S_t[i]:
        model.addConstr(SoC[i,j]-x[j]*e >= SoC_min) #constraint no.2
indicating that SoC of a vehicle that performs trip i, when departing from
bus stops s, should
        #be greater or equal than SoCmin (χρησιμοποιήσεις δεν
χρησιμοποιήσεις τον παντογράφο)

for i in T:
    for j in S_t[i]:
        model.addConstr(SoC[i, j] <= SoC_max) # constraint no.3
indicating that SoC of a vehicle that performs trip i, when departing from
bus stops s, should
        #be less or equal than SoCmax

for i in T:
    for j in S_t[i]:
        if j != S[len(S)-1]:
            model.addConstr(SoC[i, j] >= SoC_min + zitta * D[j]) #
constraint no.4 indicating that the SoC of a vehicle that performs trip i,
when departing from bus stops s, should
            #be greater than SoCmin plus the energy required to reach
the next bus stop

for i in T:
    for k in K:
        for j in S_t[i]:
            if i == phi_k[k][0]:
                if j == S_t[i][0]:
                    model.addConstr(SoC[i,j] == SoC_max) # constraint
no.4 indicating that the state of charge at the first bus stop of the first
trip
                    # is equal to SoCmax for every vehicle

for k in K:
    for i in range(1, len(phi_k[k])):
        prev_trip = phi_k[k][i - 1]
        curr_trip = phi_k[k][i]
        last_stop = S_t[prev_trip][-1] # Get last stop of the previous
trip
        first_stop = S_t[curr_trip][0] # Get first stop of the current
trip
        model.addConstr(SoC[curr_trip, first_stop] == SoC[prev_trip,
last_stop] + e_tilde * time[curr_trip, first_stop][0] * x[first_stop] -
time[curr_trip, first_stop][0] * itta)
        # constraint no.5 ensuring that the energy state of a trip at
the first bus stop after performing a trip i is equal to the SoC
        # at the last bus stop of trip i-1 plus the energy gained if a
pantograph is installed at a terminal

model.optimize()
all_vars = model.getVars()
values = model.getAttr("X", all_vars)
names = model.getAttr("VarName", all_vars)

# Print only variables with positive values

```

```
for name, value in zip(names, values):
    if value > 0:
        print(f"{name}: {value}")

if __name__ == "__main__":
    main()
```