



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

Διπλωματική Εργασία

Κόστος Λειτουργίας Λεωφορειακών Γραμμών στην Αθήνα σε περίπτωση Συμβατικών και Ηλεκτρικών Λεωφορείων

Λαμπράκου Μαριάννα



Επιβλέπων Καθηγητής: Γκιτσισαλίτης Κωνσταντίνος, Επίκουρος Καθηγητής
ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2024

Στον πατέρα μου

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με το πέρας της διπλωματικής εργασίας, σηματοδοτείται η ολοκλήρωση των προπτυχιακών σπουδών μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γκιτσισαλίτη Κωνσταντίνο, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, την καθοδήγησή του, τη στήριξη αλλά και άριστη συνεργασία. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά, τη Μαριλένα Μεράκου, Υποψήφια Διδάκτωρ της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την απέραντη υπομονή της, την υποστήριξη και καθοδήγηση που μου παρείχε καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τη μητέρα μου Αναστασία και τον αδελφό μου Χρήστο, για τη στήριξη, την υπομονή, την αγάπη και την πίστη που μου έδειξαν όλα αυτά τα χρόνια. Για τις στιγμές που μου κρατούσαν το χέρι σφιχτά και φρόντιζαν να μου υπενθυμίζουν τη φωτεινή πλευρά της ζωής.

Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω την παρούσα εργασία στον πατέρα μου Παναγιώτη, ο οποίος μπορεί να έφυγε νωρίς, αλλά σίγουρα βλέπει, προστατεύει και καμαρώνει κάθε μας στιγμή.

Αθήνα, Οκτώβριος 2024,

Λαμπράκου Μαριάννα,

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

ΣΥΝΟΨΗ

Τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στις πόλεις έχουν γεννήσει την ανάγκη για εγκατάσταση μέσων μεταφοράς με μηδενικές εκπομπές αερίων. Για τον λόγο αυτό, πολλές αρχές δημόσιων μεταφορών σκοπεύουν να αντικαταστήσουν, σε πρώτο στάδιο, τα **λεωφορεία εσωτερικής καύσης με ηλεκτρικά**, ενώ δεν είναι λίγες αυτές που έχουν ήδη ξεκινήσει την αντικατάσταση αυτών. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η **κοστολόγηση** και **σύγκριση** των δύο αυτών τύπων λεωφορείων βάσει των λειτουργικών κοστών. Κατά τη διαμόρφωση του μοντέλου, βασικός στόχος ήταν η εκτίμηση του ετήσιου λειτουργικού κόστους των συμβατικών και των ηλεκτρικών λεωφορείων σε **δύο γραμμές** του ΟΑΣΑ, καθώς και η **βελτιστοποίηση** αυτών ως προς τη διαμόρφωση προγράμματος δρομολόγησης των οχημάτων και των βαρδιών των οδηγών. Για να γίνει η ανάλυση των λεωφορειακών γραμμών, επιλέχθηκαν μια από τις μεγαλύτερες γραμμές του δικτύου και μια πολύ μικρότερη. Οι γραμμές αυτές είναι οι εξής:

- i. Γραμμή 550 Π. ΦΑΛΗΡΟ – ΚΗΦΙΣΙΑ
- ii. Γραμμή 220 ΆΝΩ ΙΛΙΣΙΑ – ΑΚΑΔΗΜΙΑ

Το μαθηματικό μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε, εφαρμόστηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Rust. Η διπλωματική εργασία βασίστηκε σε δεδομένα που συλλέχθηκαν από τον ΟΑΣΑ για μια τυπική καθημερινή ημέρα του χρόνου.

Λέξεις κλειδιά: Κοστολόγηση, λειτουργικά κόστη, βελτιστοποίηση, αυτονομία, ηλεκτρικά λεωφορεία, λεωφορειακή γραμμή

ABSTRACT

Air pollution levels in cities have created the need for the implementation of zero-emission transportation. For this reason, many public transport authorities aim to replace, as a first step, **internal combustion buses** with **electric** ones. The purpose of this thesis is to assess and compare the costs of these two types of buses based on their operational costs. During the formation of the model, the main objective was to estimate the annual operating costs of conventional and electric buses on **two lines** of the OASA, as well as to **optimize** them in terms of the formation of the vehicle routing program and the drivers' shifts. To analyze the bus routes, one of the largest routes in the network was selected, along with a much smaller one. These lines are as follows:

- i. Line 550 P. FALIRO – KIFISSIA
- ii. Line 220 ANO ILISIA – AKADIMIA

The mathematical model that was developed was implemented in the Rust programming language. The thesis relied on data collected from the Athens Public Transport Organization (OASA) for a typical weekday of the year.

Keywords: Cost estimation, operational costs, optimization, range, electric buses, bus route

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ανάμεσα στα πολλά προβλήματα που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε, όχι μόνο στην Ελλάδα αλλά σε ολόκληρη την Ευρώπη και ειδικά στις μεγαλουπόλεις αυτής, παραμένει να είναι η ατμοσφαιρική ρύπανση. Ειδικά, στην Αθήνα, τα επίπεδα των ατμοσφαιρικών ρύπων υπερβαίνουν σε επικίνδυνο βαθμό τα ασφαλή όρια. Για τον λόγο αυτό, οι αρμόδιοι φορείς καλούνται να αντικαταστήσουν τα **λεωφορεία εσωτερικής καύσης** μαζικών μεταφορών, με **ηλεκτρικά μηδενικής εκπομπής**. Το αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας ασχολείται με **το κόστος λειτουργίας των λεωφορειακών γραμμών του ΟΑΣΑ** στις δύο αυτές περιπτώσεις λεωφορειών, καθώς και τη **βελτιστοποίηση** των δρομολογίων μιας γραμμής στην περίπτωση των ηλεκτρικών λεωφορείων.

Για τη διεξαγωγή της εργασίας, αρχικά πραγματοποιήθηκε μια εκτενής **βιβλιογραφική ανασκόπηση** που σχετίζεται με επιστημονικά άρθρα, διπλωματικές εργασίες και διαδικτυακή έρευνα και αποδόθηκαν τα αποτελέσματα που αναλύονται παρακάτω. Η αναζήτηση που έγινε, στάθηκε σε δύο βασικά ερωτήματα. Πρώτον, ποιοι είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν το λειτουργικό κόστος μιας λεωφορειακής γραμμής στις δύο περιπτώσεις λεωφορείων και δεύτερον, πόσο χρειάζεται να βελτιστοποιηθεί το πρόγραμμα των δρομολογίων έπειτα από την εναλλαγή των οχημάτων από συμβατικά σε ηλεκτρικά.

Αφού παρουσιαστούν οι σχετικές έρευνες, αναλύονται με σκοπό τον εντοπισμό των μεθόδων υπολογισμού του **κόστους λειτουργίας** αλλά και την αναζήτηση τυχόν κενών που υπάρχουν στη βιβλιογραφία. Αναπτύσσεται, ύστερα ένα **μαθηματικό μοντέλο** υπολογισμού λειτουργικού κόστους, το οποίο, συλλέγοντας τα απαραίτητα **σύνολα και παραμέτρους**, είναι ικανό να βγάλει αποτελέσματα για **οποιαδήποτε λεωφορειακή γραμμή** σε οποιαδήποτε μέρα του χρόνου είναι λειτουργική. Εντοπίζεται, επίσης, η **αυτονομία** των ηλεκτρικών λεωφορείων και αναλύεται εάν αυτή ικανοποιείται κατά τη διάρκεια μιας τυπικής ημέρας. Έπειτα, προτείνεται, με τη βοήθεια της **γραφικής μεθόδου**, όπου χρειάζεται, εάν και εφόσον χρειάζεται να μεταβληθούν τα δρομολόγια μιας γραμμής και κατά πόσο αυτό επηρεάζει το κόστος λειτουργίας αυτής.

Τα στοιχεία που συλλέχθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, επικεντρώνονται στις λεωφορειακές γραμμές του Οργανισμού Αστικών Συγκοινωνιών Αθηνών (ΟΑΣΑ). Η έρευνα και ανάλυση των αποτελεσμάτων βασίστηκε σε **δύο λεωφορειακές γραμμές** του ΟΑΣΑ, οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την απόσταση που διανύουν και άρα και τα χιλιόμετρα, με σκοπό την καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων στο εύρος των λεωφορειακών γραμμών. Οι γραμμές που αναλύθηκαν είναι οι εξής:

- i. Γραμμή 550 Π. ΦΑΛΗΡΟ – ΚΗΦΙΣΙΑ
- ii. Γραμμή 220 ΆΝΩ ΙΛΙΣΙΑ – ΑΚΑΔΗΜΙΑ

Τέλος, έπειτα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων, προτείνεται για περαιτέρω πεδίο έρευνας, η εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου για περισσότερες από δύο λεωφορειακές γραμμές, αλλά και η επέκταση αυτού με δεδομένα μεγαλύτερης κλίμακας.

Πίνακας περιεχομένων

ΣΥΝΟΨΗ	4
ABSTRACT	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1 Αντικείμενο	10
1.2 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας	13
1.3 Δομή Διπλωματικής Εργασίας	13
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	14
2.1 Εισαγωγή στην Κοστολόγηση.....	14
2.2 Κοστολόγηση λεωφορειακών γραμμών σε περίπτωση συμβατικών και ηλεκτρικών λεωφορείων	15
2.3 Συμπεράσματα βιβλιογραφίας	22
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	24
3.1 Συμβολισμοί του Μοντέλου	24
3.2 Μαθηματικό Μοντέλο	28
4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	31
4.1 Εισαγωγή	31
4.2 Αριθμητικό Παράδειγμα	31
4.2.1 Περίπτωση 1 ^η – Συμβατικά Λεωφορεία	36
4.2.2 Περίπτωση 2 ^η – Ηλεκτρικά Λεωφορεία	38
4.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων	39
4.2.4 Εξέταση Αυτονομίας Ηλεκτρικών Λεωφορείων	41
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	44
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	46
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΚΩΔΙΚΑΣ RUST	48
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΓΡΑΦΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ.....	60

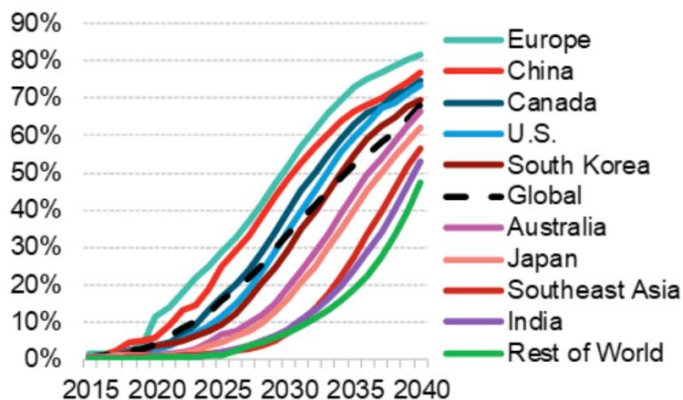
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο

Οι αστικές συγκοινωνίες αποτελούν ένα από τα βασικότερα μέσα μεταφοράς, καθώς εξυπηρετούν χιλιάδες πολίτες να μετακινηθούν καθημερινά. Τα πρώτα αστικά λεωφορεία κατασκευάστηκαν το 1895 από τον Karl Benz και η πρώτη αστική γραμμή ιδρύθηκε στη Γαλλία το 1906 [1]. Στην Αθήνα, από το 1900 οι αστικές συγκοινωνίες αρχικά λειτούργησαν από ιδιώτες ιδιοκτήτες λεωφορείων, στους οποίους είχε παραχωρηθεί άδεια για εκτέλεση αστικής συγκοινωνίας [2]. Με το πέρασμα του χρόνου, και ενώ η αυτοκινητοβιομηχανία εξελίσσεται με ταχύτερους ρυθμούς, τα καύσιμα αρχίζουν να αυξάνονται όλο και περισσότερο, με αποτέλεσμα ο κόσμος να προτιμά τις αστικές συγκοινωνίες από τις ιδιωτικές, κυρίως στις μεγαλουπόλεις [1].

Σήμερα, τα αστικά λεωφορεία είναι από τα πιο διαδεδομένα μέσα μαζικής μεταφοράς στον κόσμο. Τα τελευταία χρόνια έχει δημιουργηθεί έντονη ανησυχία για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούν οι μεταφορές. Μπορεί τα οχήματα να ενώνουν τους ανθρώπους, τους πολιτισμούς, τις πόλεις και τις χώρες, οι μεταφορές όμως ευθύνονται για το περίπου 25% των συνολικών εκπομπών αερίων της Ευρωπαϊκής Ένωσης και προκαλούν ατμοσφαιρική ρύπανση και ηχορύπανση. Επιπλέον είναι ο κύριος παράγοντας για τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου, που βλάπτουν σημαντικά το περιβάλλον αλλά και την υγεία του ανθρώπου. Καθώς, λοιπόν, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι πλέον τεράστιες, έχει αρχίσει να γίνεται σταδιακά μια αντικατάσταση των συμβατικών με ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα [3]. Για τον λόγο αυτό, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει ως στόχο την μείωση των καθαρών εκπομπών κατά τουλάχιστον 55% έως το 2030, συγκριτικά με το 1990, και να επιτύχει την κλιματική ουδετερότητα έως το 2050 [4].

EV share of new passenger vehicle sales outlook by market - Economic Transition Scenario



Source: BNEF. Note: EVs include battery-electric and plug-in hybrid electric vehicles. Battery-electric vehicles represent 88% of total electric vehicle sales in 2030. Europe includes the EU, the U.K. and EFTA countries.

Διάφορες μελέτες αλλά και αρχές έχουν προτείνει σαν μακροπρόθεσμη λύση την αντικατάσταση των συμβατικών οχημάτων με ηλεκτρικά, ως αν μέσα βιώσιμης ανάπτυξης στα συστήματα μεταφορών. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και λεωφορεία προτείνονται κυρίως για την υψηλή τους αποδοτικότητα, τις απειροελάχιστες εκπομπές τους κατά τη διάρκεια οδήγησης αυτών, των χαμηλών επιπέδων ηχορύπανσης, αλλά και της δυνατότητας τους να χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για την τροφοδότησή τους [5]. Πολλοί εκτιμούν ότι τα ηλεκτρικά οχήματα θα κυριαρχούν μετά το 2036 και τα ηλεκτρικά λεωφορεία μετά το 2030 (BloombergNEF), καθώς οι τιμές για τις μπαταρίες αυτών είναι πιθανό να μειωθούν και οι κυβερνητικές αρχές θα προτιμήσουν την ανάπτυξη αυτού του είδους μεταφοράς. Παρόλο που η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολύ μικρότερη συγκριτικά με τα καύσιμα των συμβατικών λεωφορείων, οι φορείς εκμετάλλευσης λεωφορείων είναι διστακτικοί στην εκμετάλλευση αυτών, καθώς η τιμή αγοράς τους είναι πολύ μεγαλύτερη αλλά και επειδή δε γνωρίζουν σε βάθος τη λειτουργία των ηλεκτρικών λεωφορείων και κυρίως τη συντήρησή τους. Παρόλα αυτά, μια μελέτη του [5] συνοψίζει διάφορες μελέτες που σχετίζονται με τα ηλεκτρικά λεωφορεία και συμπεραίνει πως η λειτουργία αυτών μπορεί να μειώσει το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας (TCO) κατά 10% μέσα σε μία δεκαετία. Μία μελέτη στην Ινδία δείχνει πως τα ηλεκτρικά λεωφορεία μπορούν να είναι οικονομικά ανταγωνιστικά σε 25 χρόνια [6], ενώ μια μελέτη στην Τουρκία δείχνει πως τα ηλεκτρικά έχουν σχεδόν διπλάσιο χρόνο απόσβεσης από τα συμβατικά [7].

Η μεγαλύτερη πρόκληση των εταιρειών συγκοινωνιών είναι το υψηλό κόστος εγκατάστασης των ηλεκτρικών λεωφορείων, συγκριτικά με το κόστος των συμβατικών. Η Βόρεια Αμερική και η Ευρώπη, όπου οι τιμές αγοράς ηλεκτρικών είναι πολύ υψηλότερες από αυτές στην Κίνα, προσπαθούν να βρουν επιχειρηματικά μοντέλα που θα μειώσουν το κόστος εγκατάστασης αυτών. Βασικός προβληματισμός, επίσης, είναι η αβεβαιότητα της διάρκειας ζωής της μπαταρίας του λεωφορείου και οι επιλογές στο τέλος αυτής. Βέβαια, να σημειωθεί πως όσο η αγορά για ηλεκτρικά λεωφορεία ωριμάζει, ανησυχίες σαν αυτές θα μειωθούν σε σημαντικό βαθμό.

Σύμφωνα με την BloombergNEF, τα ηλεκτρικά λεωφορεία έχουν πολύ χαμηλότερα λειτουργικά κόστη συγκριτικά με τα συμβατικά, και μπορούν να αποδειχθούν φθηνότερα βάσει του συνολικού κόστους κυκλοφορίας. Αυτό συμβαίνει γιατί τα ηλεκτρικά λεωφορεία δεν έχουν κινητήρα εσωτερικής καύσης και κινούνται με μπαταρίες, οι οποίες μειώνουν τη φθορά των μηχανικών εξαρτημάτων. Αναφέρει, δε, πως η ανταγωνιστικότητά τους βελτιώνεται σημαντικά σε μεγάλες πόλεις, όπου τα λεωφορεία ταξιδεύουν πάνω από 220χλμ/ημέρα.

Τα ηλεκτρικά λεωφορεία ήρθαν για να μείνουν στην καθημερινότητα και να αντικαταστήσουν μια για πάντα τα συμβατικά, συμβάλλοντας σε ένα περιβαλλοντικά ανεξάρτητο αύριο. Χρόνο με τον χρόνο, χώρες της Ευρώπης

αγοράζουν όλο και περισσότερα ηλεκτρικά λεωφορεία. Στο πρώτο μισό του 2022 καταχωρήθηκαν συνολικά 1.767 λεωφορεία με το 13,7% αυτών να προέρχεται από την εταιρεία VDL, ενώ στο τέλος της ίδιας χρονιάς πρώτη στις πωλήσεις στην Ευρώπη, αναδείχθηκε η Yutong. Για να πραγματοποιηθεί, λοιπόν, αυτή η μετάβαση ομαλά, θα πρέπει να γίνουν αναλύσεις και προσεκτικοί σχεδιασμοί αναφορικά με τα συστήματα φόρτισης των ηλεκτρικών, το κόστος αυτών αλλά και τις τοποθεσίες εγκατάστασης των υποδομών, τα συνολικά κόστη των ηλεκτρικών λεωφορείων και τη βιωσιμότητά τους. Αυτή τη στιγμή υπάρχουν διάφορα προγράμματα υπολογισμού κόστους που χρησιμοποιούνται από τις αρχές δημόσιας συγκοινωνίας, όπως για παράδειγμα τα HASTUS, PtMS, και Optibus, χωρίς όμως να ενσωματώνουν τα συστήματα ηλεκτρικών λεωφορείων.

1.2 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας

Ο κύριος σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η **ανάλυση λειτουργικού κόστους** των λεωφορειακών γραμμών της Αθήνας σε περίπτωση συμβατικών και ηλεκτρικών λεωφορείων. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων βασίζεται σε **δύο λεωφορειακές γραμμές** του ΟΑΣΑ, μια που εκτελεί μια διαδρομή μικρού μήκους, κινούμενη μέσα στο κέντρο του αστικού ιστού, και μια γραμμή αρκετών χιλιομέτρων, που καλύπτει αποστάσεις από τη νότια περιοχή της Αθήνας μέχρι τη βόρεια, για μια τυπική καθημερινή ημέρα του χρόνου. Για την μελέτη ανάλυσης κόστους σημαντικό ρόλο παίζουν οι **χρόνοι** όπου βρίσκονται εν ενεργεία οι οδηγοί μέσα σε ένα χρόνο, καθώς και οι **αποστάσεις** που διανύουν τα λεωφορεία. Πέραν, όμως, της ανάλυσης του κόστους, ερευνάται και αναλύεται γιατί και πόσο διαφορετικά είναι τα λειτουργικά κόστη ανάμεσα στα συμβατικά και τα ηλεκτρικά λεωφορεία, αλλά και τι **βελτιστοποιήσεις** χρειάζεται να γίνουν σε ένα μεγάλο ποσοστό του **λεωφορειακού δικτύου** με την αντικατάσταση των συμβατικών σε ηλεκτρικά. Σημαντικό ρόλο στις μεταβολές του δικτύου παίζει η **αυτονομία** των ηλεκτρικών λεωφορείων που έχει ληφθεί υπόψιν, καθώς και το γεγονός ότι αυτά φορτίζονται μόνο στα αμαξοστάσια. Το μοντέλο που έχει αναπτυχθεί, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες μελέτες για οποιαδήποτε λεωφορειακή γραμμή, στη συγκεκριμένη περίπτωση, όμως, χρησιμοποιείται για δυο συγκεκριμένες γραμμές, έτσι ώστε να μελετηθούν τα κόστη, αλλά και οποιαδήποτε πιθανή μεταβολή σε μια σχετικά μεγάλη λεωφορειακή γραμμή και σε μια μικρή.

1.3 Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Στη συγκεκριμένη εισαγωγική ενότητα μπορεί να διαπιστωθεί η αναγκαιότητα αντικατάστασης των συμβατικών με ηλεκτρικά αστικά λεωφορεία. Στη συνέχεια αυτού, οι επόμενες ενότητες της διπλωματικής εργασίας διαμορφώνονται ως εξής:

- ❖ Η δεύτερη ενότητα αποσκοπεί στη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Παρουσιάζονται διάφορες τεχνικές ανάλυσης κόστους λεωφορειακών γραμμών σε περίπτωση συμβατικών και ηλεκτρικών λεωφορείων.
- ❖ Η τρίτη ενότητα περιγράφει το πρόβλημα αλλά και τη μεθοδολογία που έχει επιλεγεί για την επίλυση αυτού, η βάση του μοντέλου, οι προϋποθέσεις εφαρμογής και οι διαμορφώσεις που έχουν γίνει.
- ❖ Η τέταρτη ενότητα περιγράφει ένα αριθμητικό παράδειγμα για το μοντέλο που έχει αναλυθεί στην προηγούμενη ενότητα και παρουσιάζει τα αποτελέσματά του. Επιπλέον, αναφέρονται τα βασικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση κόστους.
- ❖ Η πέμπτη και τελευταία ενότητα παρουσιάζει τα βασικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας αλλά και τις προτάσεις για παραπάνω έρευνα.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Εισαγωγή στην Κοστολόγηση

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο περιέχονται σημαντικές πληροφορίες για την έννοια και τα προβλήματα της κοστολόγησης, καθώς και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες μελέτες τα τελευταία χρόνια. Το θεωρητικό υπόβαθρο που αναφέρεται εδώ, εξαντλείται από τη δημοσίευση των **Jorg Roosen, Wim Marneffe & Lode Vereeck**, με τίτλο «A Review of Comparative Vehicle Cost Analysis» (2015) [8]. Πολλές είναι οι μελέτες που έχουν ασχοληθεί με την κοστολόγηση και σύγκριση διαφόρων ειδών οχημάτων, μιας και η Ευρωπαϊκή Ένωση θέλει έως το 2050 να έχει μειώσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) από τα μέσα μεταφοράς έως και 60% συγκριτικά με αυτές του 1990. Έτσι, οι κυβερνήσεις αλλά και οι αρμόδιοι φορείς αποφάσισαν πως πρέπει σταδιακά να αντικαταστήσουν τα συμβατικά λεωφορεία, με ηλεκτρικά. Για να γίνει, όμως, αυτή η αντικατάσταση, πρέπει πρώτα να γίνει μία σύγκριση κόστους ανάμεσα σε συμβατικά και ηλεκτρικά. Τέσσερεις είναι οι βασικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση κόστους: η Life Cycle Assessment (LCA), η Total Cost of Ownership (TCO), η Well – To – Wheel (WTW) και η Cost – Benefit Analysis (CBA). Οι διαφορές ανάμεσα σε αυτές τις μεθόδους είναι τα κόστη που χρησιμοποιεί η κάθε μία. Τα κόστη χωρίζονται σε ιδιωτικά και εξωτερικά. Τα ιδιωτικά κόστη περιλαμβάνουν το κόστος απόκτησης του οχήματος, αλλά και της μπαταρίας, την κατανάλωση καυσίμων ή ηλεκτρικής ενέργειας, τις εγκαταστάσεις φόρτισης, το κόστος συντήρησης και ασφάλειας μείον την αξία μεταπώλησης. Τα εξωτερικά κόστη αποτελούνται από τα άμεσα και έμμεσα κόστη μολύνσεων, τα οποία μπορούν να χαρακτηριστούν είτε σε χρηματικούς είτε σε μη χρηματικούς όρους. Τα εξωτερικά κόστη είναι στοιχεία που είναι πιο δυσεύρετα για τις μελέτες και η πλειοψηφία των ερευνών περιλαμβάνει είτε ελάχιστα δεδομένα είτε κανένα. Η μέθοδος LCA χρησιμοποιεί και συγκρίνει και τα ιδιωτικά και τα εξωτερικά κόστη, η TCO εκτιμά όλα τα έμμεσα και άμεσα κόστη που σχετίζονται με το κεφάλαιο ή την αγορά καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του. Έχει παρατηρηθεί πως όσες μελέτες έχουν δουλέψει με τη συγκεκριμένη μέθοδο και έχουν συμπεριλάβει στοιχεία από εξωτερικά κόστη, τα έχουν εκφράσει σε μη χρηματικούς όρους. Η μέθοδος WTW είναι μία λιγότερο χρησιμοποιούμενη μέθοδος, καθώς επικεντρώνεται κυρίως στα εξωτερικά κόστη, και όσες μελέτες την έχουν χρησιμοποιήσει, έχουν θεωρηθεί ατελείς. Ο συνδυασμός, όμως των τριών παραπάνω μεθόδων, αποτελεί την τέταρτη και τελευταία μέθοδο, CBA. Παρόλα αυτά, πολλοί μελετητές δεν την προτιμούν, καθώς όπως λένε, τα αρνητικά των παραπάνω μεθόδων στο συνδυασμό τους, αντικατοπτρίζονται εντονότερα στη συγκεκριμένη μέθοδο.

2.2 Κοστολόγηση λεωφορειακών γραμμών σε περίπτωση συμβατικών και ηλεκτρικών λεωφορείων

Ο μεγαλύτερος προβληματισμός που υπάρχει στην περίπτωση κοστολόγησης συμβατικών και ηλεκτρικών λεωφορείων είναι πώς θα γίνει η ορθότερη πρόβλεψη κόστους των ηλεκτρικών λεωφορείων, τη στιγμή που υπάρχουν ελάχιστα δεδομένα ακόμα ως προς το πώς αυτά ανταποκρίνονται σε διάφορα σενάρια κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Για να καταλάβουμε, λοιπόν, όσο το δυνατόν καλύτερα τη συμπεριφορά τους ως προς την κατανάλωσή τους, έχουν δημιουργηθεί διάφορα προγράμματα προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται στις μελέτες. Με αφορμή την έρευνα καλύτερης κυκλοφοριακής εφαρμογής, αλλά και την αναζήτηση του χαμηλότερου κόστους μετά το πέρας της αντικατάστασης των συμβατικών λεωφορείων με ηλεκτρικά, παρουσιάζονται οι παρακάτω μελέτες που εστιάζουν σε αυτούς τους προβληματισμούς.

Ο **Jonas Hellgren (2005)** προσπαθεί να απαντήσει στο αν είναι τα εναλλακτικά οχήματα μετάδοσης κίνησης οικονομικά για συγκεκριμένες εφαρμογές και εάν επηρεάζει την επιλογή οχήματος η αύξηση της τιμής καυσίμων. Για να απαντήσει στα ερωτήματά του, χρησιμοποιεί αρχικά ένα πρόγραμμα προσομοίωσης, το THEPS (Tool for Hybrid Electric Powertrain Synthesis), που ο ίδιος δημιούργησε στα πλαίσια του διδακτορικού του, πάνω σε ένα έργο. Μέσω του συγκεκριμένου προσομοιωτή, αλλά και από έναν αλγόριθμο, μπορούσε να υπολογίσει την κατανάλωση ενέργειας διάφορων οχημάτων σε πληθώρα οδηγικών κύκλων, αλλά και να υπολογίσει το συνολικό κόστος μέσω της μεθόδου LCA. Να σημειωθεί ότι τα κόστη που σχετίζονται με εκπομπές αερίων δεν συμπεριλήφθηκαν στη συνάρτηση καθώς είναι δύσκολο να αξιολογηθούν και να εφαρμοσθούν.

Οι **B. Suh et al. (2011)** προσπάθησαν να σχεδιάσουν ένα σύστημα κίνησης που να είναι και υβριδικό και ηλεκτρικό ταυτόχρονα. Για να φτάσουν στο τελικό τους συμπέρασμα, χρησιμοποίησαν το πρόγραμμα προσομοίωσης ADVISOR. Το ADVISOR είναι ένας προσομοιωτής βασισμένος στο Simulink και στο Matlab. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι ικανό να εκτιμήσει την οικονομία καυσίμων και τις εκπομπές που προκαλούνται από τα συμβατικά και τα ηλεκτρικά λεωφορεία. Όπως έχει αποδειχθεί, μεγάλος προβληματισμός δημιουργείται στην κατανάλωση των ηλεκτρικών όταν η μηχανή είναι κρύα. Κατάφεραν λοιπόν οι B. Suh et al. να βελτιστοποιήσουν την κατανάλωση και την εκπομπή αερίων μέσω ενός ηλεκτροκινητήρα, και για τα συμβατικά και για τα ηλεκτρικά, μέχρι να ζεσταθεί η μηχανή.

Μια επιπλέον μελέτη, από τον **Antti Lajunen (2013)**, παρουσιάζει μια ανάλυση κόστους ανάμεσα σε στόλους ηλεκτρικών και υβριδικών λεωφορείων. Μέσα από τη δημοσίευσή του, αναλύει την κατανάλωση ενέργειας και την κοστολόγηση των λεωφορείων. Για εκτεταμένη ανάλυση κατανάλωσης ενέργειας χρησιμοποιεί αποτελέσματα προσομοιώσεων από διάφορα σενάρια οδηγικών κύκλων. Για τις

προσομοιώσεις του, ο Antti Lajunen χρησιμοποιεί τον προσομοιωτή ADVISOR, ενώ η ανάλυση κόστους ορίζεται από υπολογισμούς όπου λαμβάνονται υπόψη λειτουργίες του στόλου σε διαφορετικούς τύπους διαδρομών. Με αυτό τον τρόπο και αφού βγάλει τα αποτελέσματά του, μπορεί να είναι σε θέση να τα συγκρίνει με τα στοιχεία των συμβατικών λεωφορείων. Καταλήγει στο συμπέρασμα πως μελλοντικά η αντικατάσταση των συμβατικών λεωφορείων με ηλεκτρικά ή/και υβριδικά, σίγουρα θα μειώσει τις εκπομπές αερίων, αλλά και με την πρόβλεψη ότι θα μειωθούν οι τιμές των μπαταριών στο μέλλον, αλλά και τη στήριξη από τις κυβερνήσεις, τα συνολικά κόστη θα είναι επίσης μικρότερα σε σχέση με αυτά των συμβατικών.

Επίσης, οι **D. Göhlich et al. (2013)** πραγματοποίησαν μια έρευνα πάνω σε ένα ηλεκτρικό σύστημα αστικών λεωφορείων για την πόλη του Βερολίνου. Για την ολοκληρωμένη ανάλυσή τους, αρχικά χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο ενεργειακής προσομοίωσης για να προβλέψουν την ενέργεια που χρειάζεται να καταναλώνεται καθημερινά. Έπειτα συνέλεξαν πιθανές επιλογές ηλεκτρικών λεωφορείων με βάση τεχνικούς και οικονομικούς παράγοντες. Τέλος, συνέκριναν τα αποτελέσματα των πιθανών σεναρίων με τα τεχνικά και οικονομικά στοιχεία των συμβατικών λεωφορείων του Βερολίνου. Οι προσομοιώσεις για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιήθηκαν με το μοντέλο Monte Carlo και η ανάλυση κόστους με τη μέθοδο TCO. Η μελέτη χρησιμοποιεί επίσης, διαφορετικά σενάρια φόρτισης κάθε φορά για τα ηλεκτρικά λεωφορεία, παρόλα αυτά χρήζει περισσότερης ανάλυσης, λαμβάνοντας υπόψη μια μεγαλύτερη ποσότητα τεχνολογιών και χαρακτηριστικών του στόλου λειτουργίας.

Άλλη μια μελέτη, από τους **Lisiana Nurhadia et al. (2014)** χρησιμοποίησε τεχνικούς και οικονομικούς παράγοντες για να αναλύσει και να συγκρίνει το κόστος ηλεκτρικών αλλά και υβριδικών λεωφορείων, διαφορετικής χωρητικότητας μπαταριών και διαφορετικών φορτιστών. Εστιάζει σε παράγοντες όπως τα κόστη επένδυσης, τα ενεργειακά κόστη, τα κόστη συντήρησης και τα χρόνια λειτουργίας. Για να κάνει τη σύγκριση ανάμεσα στους διαφορετικούς τύπους λεωφορείων, χρησιμοποιεί τη μέθοδο TCO. Συμπεραίνει πως τα ηλεκτρικά λεωφορεία, ειδικά αυτά με κανονικούς φορτιστές, γενικά έχουν χαμηλότερο TCO σε σύγκριση με τα υβριδικά λεωφορεία και πως τα μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα λειτουργίας και οι μεγαλύτερες αποστάσεις γραμμών σχετίζονται με χαμηλότερο TCO.

Αργότερα, οι **Oscar Olsson et al. (2016)** προσπάθησαν να αναλύσουν την επίδραση της χρήσης ηλεκτρικών λεωφορείων στο περιβάλλον και στην οικονομία. Μέσω αναλυτικής μεθόδου και μαθηματικής ελαχιστοποίησης κόστους εξετάζουν τα οφέλη της χρήσης ηλεκτρικών λεωφορείων σε σχέση με τα παραδοσιακά λεωφορεία που λειτουργούν με καύσιμα ορυκτής προέλευσης. Η μελέτη αναφέρει ότι η εισαγωγή ηλεκτρικών λεωφορείων μπορεί να μειώσει τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και την ατμοσφαιρική ρύπανση, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να

προσφέρει οικονομικά οφέλη μέσω της μείωσης των καταναλωτικών και συντηρητικών δαπανών.

Σε ένα άλλο άρθρο, οι **Aigars Laizāns et al. (2016)** εξετάζουν την οικονομική εφικτότητα των ηλεκτρικών λεωφορείων. Αναλύουν τη μεθοδολογία αξιολόγησης των οικονομικών πτυχών δύο τεχνολογιών βασιζόμενοι στην υφιστάμενη κατάσταση στη Λετονία. Το κείμενο παρουσιάζει ανάλυση κόστους και οφέλους, με τη μέθοδο TCO, καθώς και διάφορες παραμέτρους που επηρεάζουν την οικονομική απόδοση των ηλεκτρικών λεωφορείων σε σύγκριση με τα παραδοσιακά λεωφορεία με εσωτερική καύση. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι παρόλο που οι λειτουργικές δαπάνες για τα ηλεκτρικά λεωφορεία είναι χαμηλότερες, το κόστος αντικατάστασης μπαταριών είναι ακόμα υψηλό, με αποτέλεσμα τα ηλεκτρικά λεωφορεία να μην καλύπτουν ακόμα τα επιπλέον κόστη. Τέλος, το κείμενο προτείνει περαιτέρω μελέτες για την οικονομική εφικτότητα εναλλακτικών τεχνολογιών όπως η ασύρματη φόρτιση μπαταριών.

Μία άκρως σημαντική και ενδιαφέρουσα μελέτη, είναι αυτή των **Dietmar Gohlich et al. (2017)**, όπου έκαναν μια σημαντική έρευνα πάνω στο σύνολο του σχεδιασμού των συστημάτων ηλεκτρικών λεωφορείων. Παρουσιάζουν μια ολιστική μεθοδολογία σχεδιασμού για τον εντοπισμό της «πιο κατάλληλης λύσης συστήματος», βασιζόμενοι σε συγκεκριμένες στρατηγικές και λειτουργικές απαιτήσεις. Αναλύουν, επίσης, τις σχετικές τεχνολογίες οχημάτων και τις μεθόδους φόρτισης αυτών και εισάγουν ένα μοντέλο το οποίο μπορεί να εφαρμοσθεί, καθώς λένε, για τον καθορισμό ενός εφικτού συστήματος ηλεκτρικών λεωφορείων. Η τεχνοοικονομική τους μελέτη βασίζεται σε λεπτομερή οικονομική ανάλυση που πραγματοποιείται μέσω TCO. Επιπλέον, εφαρμόζεται στοχαστική μοντελοποίηση των κρίσιμων εισροών και αξιοποιούνται τρία διαφορετικά μελλοντικά σενάρια, με σκοπό την αντιμετώπιση αβεβαιοτήτων στην πρόβλεψη.

Οι **Anal Sheth & Debasis Sarkar (2018)** μελετούν την περίπτωση αντικατάστασης των συμβατικών λεωφορείων με ηλεκτρικά, στην Ινδία. Υπολογίζουν την εφικτότητα αυτού και υπολογίζουν τον κύκλο ζωής (LCC) της προμήθειας και λειτουργίας ηλεκτρικών λεωφορείων σε σύγκριση με τα πετρελαιοκίνητα λεωφορεία, βασιζόμενοι σε μια λειτουργική μονάδα ενός λεωφορείου που διανύει 100 χλμ ανά ημέρα. Πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας για το TCO του ηλεκτρικού λεωφορείου με σκοπό να προετοιμαστεί μια αξιόπιστη περίπτωση που θα λαμβάνει υπόψη τις διακυμάνσεις της αγοράς και τις υποθέσεις της έρευνας. Η ανάλυση ανά συστατικό υποδεικνύει αρκετά μέτρα που μπορούν να ληφθούν για τη βελτίωση της βιωσιμότητας και εφικτότητας των ηλεκτρικών λεωφορείων. Ο στόχος της έρευνας είναι να διευκολύνει τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την υιοθέτηση της ηλεκτροκινητικότητας από τους αντίστοιχους αστικούς φορείς.

Αξιζει να αναφερθει και η αναφορα των **Orhan Topal & Ismail Nakir (2018)**, όπου διερευνούν την καταλληλότητα ενός ηλεκτρικού λεωφορείου για τις συνθήκες της Κωνσταντινούπολης. Προτείνουν ένα δυναμικό μοντέλο βασισμένο στην ανάλυση TCO και εξετάζουν πετρελαιοκίνητα, CNG και ηλεκτρικά λεωφορεία. Έπειτα, πραγματοποιούνται οι μέθοδοι Καθαρής Τιμής Παρούσας (NPV), Εσωτερικού Ρυθμού Επιστροφής (IRR) και Περιόδου Αποπληρωμής (PB), λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές TCO, προκειμένου να συγκριθούν τα διαφορετικά κοινά λεωφορείων.

Οι **Fabian Meishner & Dirk Uwe Sauer (2019)** συνεργάστηκαν με διάφορους φορείς δημόσιων μεταφορών σε τέσσερις ευρωπαϊκές πόλεις με στόχο να βγάλουν ρεαλιστικά αποτελέσματα. Επικεντρώνονται σε μια οικονομική σύγκριση βασισμένη, επίσης, στη μέθοδο TCO, συμπεριλαμβανομένων όλων των επενδύσεων και λειτουργικών κοστών στην υπηρεσία λεωφορείων. Στο συγκεκριμένο άρθρο η μπαταρία εξετάζεται λεπτομερώς, ιδίως όσον αφορά την αναμενόμενη διάρκεια ζωής της και στα κόστη υπολογίζονται και αυτά που αφορούν τις ποινές για τις εκπομπές θορύβου και ρύπων.

Σύμφωνα με τους **Samuel Pelletier et al. (2019)**, για να επιτευχθεί μια ομαλή μετάβαση από συμβατικά σε ηλεκτρικά λεωφορεία, είναι απαραίτητο να έχει ερευνηθεί πρώτα το πρόβλημα αντικατάστασης στόλου όπου θα επιτρέπει σε οργανισμούς να καθορίσουν σχέδια αντικατάστασης λεωφορείων που θα πληρούν τους στόχους ηλεκτροκίνησης τους με κοστολογικά αποδοτικό τρόπο, λαμβάνοντας υπόψη τα κόστη αγοράς, τα έσοδα από απόσβεση, τα λειτουργικά κόστη, τις επενδύσεις σε υποδομές φόρτισης και τα τέλη ζήτησης. Λαμβάνονται υπόψη διάφορες επιλογές υποδομής φόρτισης, όπως σταθμοί αργής και γρήγορης φόρτισης, φορτιστές με αισθητήρα άνω και επανωθετικούς φορτιστές (ασύρματους) και μοντελοποιείται το πρόβλημα ως ένα γραμμικό πρόβλημα ακεραίων. Το μοντέλο εφαρμόζεται για να διενεργηθούν υπολογιστικά πειράματα βασισμένα σε διάφορα σενάρια, βασισμένα σε πραγματικά δεδομένα.

Αντίστοιχα, οι **Anders Grauers et al. (2020)** αναφέρουν ότι απλή μοντελοποίηση του κόστους δεν μπορεί να δείξει πώς τα κόστη για διαφορετικούς τύπους ηλεκτρικών λεωφορείων διαφέρουν μεταξύ διαφορετικών δρομολογίων και χρονοδιαγραμμάτων. Εφαρμογές που αποσκοπούν σε τέτοιους σκοπούς (όπως HASTUS, PtMS, και orfibus), συνήθως είναι χρονοβόρα και ανεπαρκή σχετικά με ό,τι επηρεάζει το κόστος, για αυτό, προτείνουν μια μέθοδο για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους κυριότητας, για διαφορετικούς τύπους ηλεκτρικών λεωφορείων, με τρόπο που μπορεί να προβλέπει πώς μεταβάλλεται το κόστος με βάση το δρομολόγιο και το χρονοδιάγραμμα. Η μέθοδος αυτή βασίστηκε στην ανάλυση TCO και σε προσομοιώσεις με τη βοήθεια των Matlab & Simulink. Η δοκιμή της μεθόδου σε ένα Σουηδικό πλαίσιο έδειξε ότι τα αποτελέσματα είναι σύμφωνα με άλλες θεωρητικές και πρακτικές μελέτες, και πώς το συνολικό κόστος κυριότητας μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τις μεταβλητές.

Σε μια άλλη δημοσίευση, των **Neil Quarles et al. (2020)**, αναλύεται το κόστος αλλά και τα οφέλη των ηλεκτρικών και αυτόματων λεωφορείων, κατά την εφαρμογή τους στις μεταφορές. Λαμβάνουν υπόψη τα άμεσα κόστη και με τη χρήση της μεθόδου LCCA ενημερώνουν τους εκμεταλλευτές στόλων και τους κατασκευαστές για τις προϋπολογιστικές επιπτώσεις της μετατροπής ενός στόλου λεωφορείων σε ηλεκτρική ενέργεια και για τις παραμέτρους κόστους που επιτρέπουν στα ηλεκτρικά λεωφορεία να παρέχουν προϋπολογιστικά οφέλη έναντι των πετρελαιοκίνητων αντιστοίχων τους.

Οι **Jakov Topić et al. (2020)** με αφορμή την ένταξη της ηλεκτροκίνησης στη καθημερινότητά μας, σχεδίασαν ένα εργαλείο προσομοίωσης για το σχεδιασμό των ηλεκτρικών αστικών λεωφορείων, το οποίο σχεδιάστηκε για να χρησιμοποιεί πραγματικά/καταγεγραμμένα κύκλους οδήγησης και τεχνο-οικονομικά δεδομένα, προκειμένου να υπολογίζει τον βέλτιστο τύπο και αριθμό ηλεκτρικών λεωφορείων και φορτιστών, και να προβλέπει το συνολικό κόστος κυριότητας, συμπεριλαμβανομένου του κόστους επένδυσης και εκμετάλλευσης. Επικεντρώνεται σε μια υπολογιστικά αποδοτική προσομοίωση του στόλου ηλεκτρικών λεωφορείων, που περιέχει τον έλεγχο της μονάδας κίνησης και τον έλεγχο της φόρτισης, το οποίο επισημαίνεται μέσω των κυριότερων αποτελεσμάτων μιας δοκιμής πιλοτικού σχεδιασμού ηλεκτροκίνησης των λεωφορείων για μια συγκεκριμένη πόλη. Τα εργαλεία που χρησιμοποιούν στην ανάλυσή τους είναι το E-Bus Simulation Module (EBSM), το Charging Optimisation Module (COM), το Techno-Economic Analysis Module (TEAM), αλλά και η μέθοδος TCO.

Επιπρόσθετα, οι **Emilia M. Szumska et al. (2022)** επικεντρώνονται στην οικονομική και ενεργειακή αποδοτικότητα των αστικών λεωφορείων με διαφορετικούς τύπους συστήματος κίνησης, μελετημένων για συγκεκριμένες αστικές και προαστιακές διαδρομές. Οι διαδρομές διαφέρουν ως προς τον αριθμό των δρομολογίων ανά ημέρα, το υπόμετρο, την ημερήσια απόσταση που διανύεται και τον ημερήσιο χρόνο λειτουργίας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι συνθήκες οδήγησης μπορούν να επηρεάσουν την οικονομική αποδοτικότητα. Η μέθοδος TCO, που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη, δείχνει ότι τα ηλεκτρικά λεωφορεία αντιπροσωπεύουν τις υψηλότερες τιμές TCO μεταξύ των οχημάτων που λαμβάνονται υπόψη.

Οι **Hussein Basma et al. (2022)** θίγουν το υψηλό κόστος των ηλεκτρικών λεωφορείων, το οποίο οφείλεται στα κόστη των μπαταριών και των υποδομών τους. Παρουσιάζουν μια τεχνοοικονομική ανάλυση των ηλεκτρικών λεωφορείων με τη βοήθεια της καθαρής παρούσας αξίας (NPW) και της μεθόδου TCO που λαμβάνει υπόψη το κόστος αγοράς, λειτουργίας, συντήρησης και υποδομής.

Αρκετές είναι οι μελέτες οι οποίες έχουν αναφερθεί στην ανάλυση κόστους των λεωφορειακών γραμμών σε περίπτωση ηλεκτρικών και συμβατικών λεωφορείων, τα τελευταία χρόνια, χρησιμοποιώντας η κάθε μια διαφορετικές παραμέτρους,

μεθόδους και παραδοχές. Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται βασικές επιστημονικές εργασίες της βιβλιογραφικής ανασκόπησης και διευκρινίζονται για την κάθε μία οι μεταβλητές απόφασης, ο στόχος που έχει η κάθε μελέτη, καθώς και η μέθοδος για κάθε μία από αυτές.

Επιστημονική Εργασία	Μεταβλητές Απόφασης	Στόχος	Μέθοδος Επίλυσης / Δίκτυο Εφαρμογής
Jonas Hellgren (2005)	Design variables & major expenses connected to use a vehicle	Assess powertrain choices for different applications and scenarios	LCC (Life Cycle Cost) / THEPS software
B. Suh, Y. H. Chang, S. B. Han & Y. J. Chung (2011)	Driving cycle & vehicle speed	Design the powertrain of a plug-in parallel hybrid electric bus & develop a powertrain control strategy	ADVISOR Simulation tool on Simulink & Matlab
Antti Lajunen (2013)	Life cycle costs for the different bus fleets in each operation route	Analyse the energy consumption & the total costs of different bus routes	Cost Benefit Analysis (CBA) / ADVISOR simulation program
D. Goehlich et al. (2013)	Vehicle, Financing, Operating, Infrastructure & emission costs	Evaluation of innovative bus systems	Monte Carlo Simulation / TCO analysis
Lisiana Nurhadi et al. (2014)	Technical and economical parameters	Analyze the economic comparisons of two electric buses with different driving range & different type of chargers	TCO analysis
Oscar Olsson et al. (2016)	Vehicles, infrastructure and battery costs for different charging scenarios	Analyze what kind of electric bus and charging system has lowest total cost	Analysis method / mathematical cost minimization
Aigars Laizāns, Aivars Rubenis et al. (2016)	Bus capital, infrastructure and operating costs	Assess the current financial viability of electric buses from regional perspective	TCO analysis
Dietmar Göhlich et al. (2017)	Technical and operational aspects in three different future scenarios	Trying to prove the technical feasibility of electric bus systems and their economic competitiveness from the year 2025	TCO (Total Cost of Ownership) / Modular simulation model
Anal Sheth & Debasis Sarkar (2018)	Technical, economical & environmental parameters	Enable decision-making on the adoption of electric mobility by respective urban local bodies	Life cycle cost analysis
Orhan Topal, Ismail Nakir (2018)	Technical and economical parameters	Seek the suitability as an electric bus concept for Istanbul conditions	TCO (Total Cost of Ownership) from well to wheel / Dynamic model called "Zero - Emission Bus Purchase & Operation Model (ZEBusPOM)"
Fabian Meishner, Dirk Uwe Sauer (2019)	Include all investment and operating costs in the bus service, as well as the battery life	Economic comparison between diesel and electric buses	TCO /cost model & simulation in MATLAB / Simulink
Samuel Pelletier et al. (2019)	Buses and chargers	Present a bus fleet replacement problem whose solution provides a transition plan that will respect such targets in a cost - effective way	Integer linear programming model (EBFTP)
Andres Grauers, Sven Borén, Oscar Enerbäck (2020)	Routes and timetable	Trying to predict how the cost varies based on route and timetable	TCO /cost model & simulation in MATLAB / Simulink
Neil Quarles et al. (2020)	Bus capital, infrastructure and operating costs and operating assumptions	Analyze the costs and benefits of electrifying and automating bus transit fleets	Life cycle cost analysis / analysis of direct costs
Jakov Topic et al. (2020)	Driving cycles & techno - economic data	Calculate the optimal type & number of e-buses & chargers & predict the total cost	E-Bus Simulation Module (EBSM)/ Charging Optimisation Module (COM)/ Techno-Economic Analysis Module (TEAM)/ TCO
Emilia M. Szumska et al. (2022)	Purchase cost, fuel (energy) cost, repair & maintenance cost	Economic efficiency analysis of city buses for selected urban & suburban routes	TCO analysis
Hussein Basma et al. (2022)	Different battery sizes & charging infrastructures and strategies	Analyze a techno - economic performance of battery electric bus fleets	Net Present Worth (NPW) of the TCO

Πίνακας 1. Βασικά στοιχεία βιβλιογραφίας

2.3 Συμπεράσματα βιβλιογραφίας

Η κοστολόγηση των λεωφορειακών γραμμών σε περίπτωση συμβατικών και ηλεκτρικών λεωφορείων έχει φέρει, πολλές προκλήσεις τα τελευταία χρόνια στις υπηρεσίες αλλά και τους φορείς εκμετάλλευσης των αστικών λεωφορείων. Η μέθοδος φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων είναι βασικό στοιχείο διαφοροποίησης της κάθε μελέτης, καθώς αρκετές είναι αυτές που βασίζονται στην φόρτιση μόνο στα αμαξοστάσια, ενώ άλλες χρησιμοποιούν τη μέθοδο φόρτισης στις στάσεις αυτών και πολλές είναι εκείνες που χρησιμοποιούν και τις δύο μεθόδους. Άλλη μια βασική διαφορά ανάμεσα στις μελέτες είναι το εύρος των διαδρομών που χρησιμοποιεί η κάθε μια, για να καταλήξει στο τελικό της συμπέρασμα. Κάποιες μελέτες χρησιμοποιούν τυχαίες διαδρομές, άλλες επιλέγουν να αναλύσουν τις πιο χαρακτηριστικές και κάποιες μιλούν για τον μέσο όρο αυτών. Τέλος, στο πέρασμα των παραπάνω μελετών, παρατηρήθηκε μια ποικιλία μεθόδων ανάλυσης κόστους των γραμμών. Οι πιο πρόσφατες, όμως, αναφορές και εκείνες που ταίριαζαν περισσότερο με το δικό μας ζητούμενο, αλλά και τα δικά μας διαθέσιμα δεδομένα, χρησιμοποιούν τη μέθοδο Total Cost of Ownership (TCO), ούτως ώστε να καταλήξουν στα αποτελέσματα, και κάνοντας τις κατάλληλες συγκρίσεις, να σχηματίσουν τα συμπεράσματα αλλά και τα περιθώρια βελτίωσης στην κάθε περίπτωση.

Κάθε επιστημονική μελέτη αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη μετάβαση των λεωφορείων από συμβατικά σε ηλεκτρικά, αλλά και την ανάλυση κόστους αυτών. Από τις προαναφερθείσες μελέτες, αξιοσημείωτη είναι εκείνη των **Dietmar Göhlich et al. (2017)** όπου κάνουν μια λεπτομερή ανάλυση των ηλεκτρικών λεωφορείων και δίνουν να καταλάβει κανείς σε βάθος τον τρόπο κατασκευής αλλά και λειτουργίας τους. Επίσης, σημαντική είναι η μελέτη των **Emilia M. Szumska et al. (2022)** όπου επικεντρώνεται σε ένα συγκεκριμένο εύρος γραμμών, ενώ είναι η μόνη που αναλύει αστικές αλλά και προαστιακές γραμμές.

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που εκτελέσθηκε, το άρθρο που απασχόλησε και έδωσε τη μεγαλύτερη έμπνευση διαμόρφωσης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, είναι εκείνο των **Andres Grauers, Sven Borén & Oscar Enerbäck (2020)**, οι οποίοι αναφέρονται στα κόστη που επηρεάζουν περισσότερο τις συνολικές δαπάνες των ηλεκτρικών λεωφορείων, αλλά κάνουν και οικονομική σύγκριση με τα συμβατικά. Το συγκεκριμένο άρθρο θεωρήθηκε ως μελέτη σταθμός για τη διπλωματική εργασία, καθώς είναι εκείνο το οποίο πληροί τα κριτήρια που χρειάζεται να εφαρμοσθούν στη συγκεκριμένη μελέτη, αλλά και επειδή φάνηκε ότι υπήρχαν περιθώρια εξέλιξης της συγκεκριμένης ανάλυσης.

Οι **Andres Grauers, Sven Borén, Oscar Enerbäck (2020)** για το συνολικό ετήσιο κόστος κάθε λεωφορειακής γραμμής χρησιμοποίησαν τρία βασικά σύνολα, το Σύνολο των Λεωφορείων, το Σύνολο των Διαδρομών και το Σύνολο των Σταθμών Φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων. Τέλος, όρισαν σαν μεταβλητές

τον αριθμό των λεωφορείων, την απόσταση οδήγησης, την απόδοση κατανάλωσης ενέργειας ανά χιλιόμετρο, τον τρόπο και τη συχνότητα φόρτισης των ηλεκτρικών λεωφορείων, την χρονική περίοδο για την οποία εκτιμάται το TCO και την τιμή ενέργειας και καυσίμων.

Αναφορικά με την οικονομική ζωή των μπαταριών των ηλεκτρικών λεωφορείων, που αναφέρθηκε παραπάνω, αξίζει να σημειωθεί πως είναι ένας κρίσιμος παράγοντας, που επηρεάζει την απόδοση και το συνολικό κόστος χρήσης αυτών των οχημάτων. Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στα λεωφορεία αυτά, έχουν διάρκεια ζωής που μετράται σε κύκλους φόρτισης. Ένας τυπικός αριθμός κύκλων φόρτισης κυμαίνεται από 2.000 έως 4.000, ανάλογα με τον τύπο μπαταρίας και τις συνθήκες μπαταρίας. Οι κύκλοι που αναφέρθηκαν παραπάνω αντιστοιχούν σε περίπου 6 έως 12 χρόνια. Η οικονομική ζωή των μπαταριών επηρεάζεται από 3 βασικούς παράγοντες: τις συνθήκες φόρτισης, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και τη χρήση των λεωφορείων. Η τακτική γρήγορη φόρτιση μπορεί να επιβαρύνει τις μπαταρίες, μειώνοντας τη διάρκεια ζωής τους, ενώ η προσεχτική διαχείριση της φόρτισης μπορεί να επεκτείνει την οικονομική ζωή της μπαταρίας. Αναφορικά με τη θερμοκρασία, οι πολύ χαμηλές ή υψηλές θερμοκρασίες επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση και τη διάρκεια ζωής των μπαταριών. Επιπλέον, τα ηλεκτρικά λεωφορεία που λειτουργούν σε απαιτητικές συνθήκες, όπως μεγάλα φορτία ή συχνή επιτάχυνση / επιβράδυνση, μπορεί να επιβαρύνουν περισσότερο τις μπαταρίες.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

3.1 Συμβολισμοί του Μοντέλου

Το πρόβλημα που περιγράφεται σε αυτή την εργασία αφορά την ανάλυση λειτουργικού κόστους λεωφορειακών γραμμών της Αθήνας σε περίπτωση συμβατικών και ηλεκτρικών λεωφορείων, καθώς και την βελτιστοποίηση του προγράμματος των δρομολογίων στην περίπτωση των ηλεκτρικών. Για τον σκοπό αυτό, αναλύονται δύο συγκεκριμένες λεωφορειακές γραμμές και για τις δύο περιπτώσεις και συγκρίνονται σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα, βασισμένο στην οικονομική ζωή της μπαταρίας του λεωφορείου. Καθορίζονται τα δρομολόγια και οι διαδρομές, οι χρονικές περίοδοι που χρειάζονται για τη λειτουργία κάθε λεωφορειακής γραμμής σε μία μέρα, αλλά και σε ένα χρόνο, καθώς επίσης τα κόστη λειτουργίας των γραμμών. Στόχος είναι να διερευνηθεί σε ένα συγκεκριμένο εύρος χρόνου εάν τα ηλεκτρικά λεωφορεία είναι, πέρα από περιβαλλοντικά, και οικονομικά βέλτιστα σε σχέση με τα συμβατικά που χρησιμοποιούνται τώρα και να προταθούν λύσεις που πιθανόν βελτιώσουν ακόμα περισσότερο την αποδοτικότητα των ηλεκτρικών.

Στη συνέχεια αναφέρεται το μοντέλο, το οποίο προσεγγίζεται με τον τρόπο που αναλύθηκε από τους **Andres Grauers, Sven Borén & Oscar Enerbäck (2020)**. Οι μελετητές εστίασαν πάνω στα βασικά στοιχεία που απαιτούνται για την ανάλυση κόστους, αναλύοντας εκτενώς τα κυριότερα δεδομένα που απαιτούνται ώστε να υπολογισθεί το κόστος λειτουργίας. Πάνω στο συγκεκριμένο μοντέλο έγιναν τροποποιήσεις, αλλά και προσθήκες, οι οποίες περιγράφονται παρακάτω.

Ωστόσο, ανάμεσα στα δύο μοντέλα σημειώνονται οι εξής διαφοροποιήσεις:

1. Αρχικά, η συγκεκριμένη μελέτη επικεντρώνεται σε δύο και μόνο δύο λεωφορειακές γραμμές.
2. Η παρούσα εργασία, επίσης, επικεντρώνεται στα λειτουργικά κόστη μιας γραμμής, συγκρίνοντας τις διαφορές ανάμεσα στα δύο είδη λεωφορείων.
3. Η απόσταση από το αμαξοστάσιο στην αφετηρία δεν μετρείται χιλιομετρικά, αλλά λαμβάνεται υπόψιν ως ένα συγκεκριμένο ποσοστό από τη διαδρομή της εκάστοτε γραμμής.
4. Τέλος, το μοντέλο είναι ικανό με βάση τα προγραμματισμένα δρομολόγια, να προβλέψει πότε κάποιο λεωφορείο μιας συγκεκριμένης γραμμής ξεπερνάει το ποσοστό της αυτονομίας του και είναι υποχρεωμένο να επιστρέψει στο αμαξοστάσιο για τη φόρτισή του.

Η προειδοποίηση αυτονομίας που αναφέρθηκε παραπάνω, θα συμβάλλει στον επαναπροσδιορισμό των λεωφορείων που απαιτούνται σε μια τυπική ημέρα στην

περίπτωση των ηλεκτρικών λεωφορείων, ή στην αναδιάταξη των προγραμματισμένων δρομολογίων με τα ήδη υπάρχοντα λεωφορεία. Με αυτόν τον τρόπο οι φορείς εκμετάλλευσης αυτών θα είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν με μεγαλύτερη ευκολία τις όποιες προκλήσεις κληθούν να αντιμετωπίσουν αναφορικά με την κατανάλωση ενέργειας των ηλεκτρικών λεωφορείων αλλά και την ανακατάταξη των δρομολογίων.

Για τη σαφέστερη διατύπωση του μοντέλου και κατ' επέκταση του προβλήματος, παρατίθενται αρχικά τα μαθηματικά σύνολα και αναλύονται οι παράμετροι των στοιχείων του μαθηματικού μοντέλου. Έπειτα, αναφέρονται οι παραδοχές που λήφθηκαν υπόψιν κατά τη διάρκεια της μελέτης.

Ειδικότερα, τα σύνολα και οι παράμετροι του προβλήματος παρουσιάζονται παρακάτω ως εξής:

Πίνακας 1. Συμβολισμοί

Σύνολα	
$B = \{b_1, b_2, \dots, b_{ B }\}$	Σύνολο λεωφορείων
$S_G = \{s_1, s_2, \dots, s_{ S_G }\}$	Σύνολο στάσεων «πήγαινε»
$S_R = \{s_1, s_2, \dots, s_{ S_R }\}$	Σύνολο στάσεων «έλα»
Παράμετροι	
N	Ημέρες ανά τον χρόνο όπου μια λεωφορειακή γραμμή είναι λειτουργική (days/yr)
DHW	Ωρομίσθιο των οδηγών (€/hr)
E_{Mean}	Μέση κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά διαδρομή (kWh/klm)
D_{Mean}	Μέση κατανάλωση καυσίμων ανά διαδρομή (lt/klm)
P_{En}	Μέση τιμή ηλεκτρικής ενέργειας (€/kWh)
P_{Dies}	Μέση τιμή καυσίμων (€/lt)
U	Παράγοντας αξιοποίησης οδηγών (%)
BC	Χωρητικότητα μπαταρίας (kWh)
AU	Αυτονομία λεωφορείων (km)
$dist_G$	Απόσταση διαδρομής «πήγαινε» (km)
$dist_R$	Απόσταση διαδρομής «έλα» (km)

$T_G(b_x)$	Αριθμός αναχωρήσεων από την αφετηρία
$T_R(b_x)$	Αριθμός αναχωρήσεων από το τέρμα
$T_{H_G}(b_x)$	Κρυφά δρομολόγια οχήματος «πήγαινε»
$T_{H_R}(b_x)$	Κρυφά δρομολόγια οχήματος «έλα»
$dist_{Line}(b_x)$	Απόσταση που διένυσε ένα όχημα πάνω στη γραμμή (χωρίς τις αποστάσεις από / προς αμαξοστάσιο) (km)
$dist_{Total}(b_x)$	Απόσταση που διένυσε ένα όχημα πάνω στη γραμμή (με τις αποστάσεις από / προς αμαξοστάσιο) (km)
$dist_{Pull}(b_x)$	Απόσταση από / προς το αμαξοστάσιο (km)
$dist_{Total}$	Συνολική απόσταση οδήγησης (km)
$dur_G(b_x, t_y)$	Χρόνος που οδηγήθηκε ένα όχημα πάνω στη γραμμή «πήγαινε» για ένα δρομολόγιο (min)
$dur_R(b_x, t_y)$	Χρόνος που οδηγήθηκε ένα όχημα πάνω στη γραμμή «έλα» για ένα δρομολόγιο (min)
$dur_{Line}(b_x)$	Χρόνος που οδηγήθηκε ένα όχημα πάνω στη γραμμή για όλα τα δρομολόγια (χωρίς τα κρυφά δρομολόγια) (min)
$dur_{Total}(b_x)$	Συνολικός χρόνος που οδηγήθηκε ένα όχημα πάνω στη γραμμή για όλα τα δρομολόγια (με τα κρυφά δρομολόγια) (min)
dur_{Total}	Συνολικός χρόνος οδήγησης (min)
dur_{Paid}	Τελικός χρόνος πληρωμής οδηγών (min)
C_{Dr}	Ημερήσιο κόστος οδηγού (€ ανά ημέρα)
$C_{DrFinal}$	Συνολικό κόστος οδηγού ανά χρόνο (€/km)
C_{En}	Ημερήσιο κόστος ενέργειας / καυσίμων (€ ανά ημέρα)
$C_{EnFinal}$	Συνολικό κόστος ενέργειας / καυσίμων ανά χρόνο (€/km)

Η μαθηματική διατύπωση που παρουσιάζεται παρακάτω, βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

1. Το εκάστοτε λεωφορείο είναι ικανό να εκτελέσει μια διαδρομή μέχρι να φτάσει το όριο αυτονομίας του. Όταν έχει καταναλωθεί το 80% της αυτονομίας, τότε ο οδηγός είναι υποχρεωμένος να το επιστρέψει στο αμαξοστάσιο [27].

2. Η αυτονομία είναι εκφρασμένη σε χιλιόμετρα, σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οχήματος που έχει αποδώσει η αυτοκινητιστική βιομηχανία των ηλεκτρικών λεωφορείων που εξετάζονται [30].
3. Τα λεωφορεία αναχωρούν κάθε μέρα από τα αμαξοστάσια με πλήρως φορτισμένη μπαταρία.
4. Σε περίπτωση που κάποιο λεωφορείο ξεπερνάει τη μία ώρα αναμονής στην αφετηρία ή στο τέρμα της υπό εξέταση λεωφορειακής γραμμής, αυτό θεωρείται ότι επιστρέφει στο αμαξοστάσιο. Έτσι, δημιουργούνται τα λεγόμενα «κρυφά» δρομολόγια.
5. Η απόσταση από το αμαξοστάσιο στην αφετηρία μιας λεωφορειακής γραμμής ισούται με το 20% του μήκους διαδρομής από την αφετηρία στο τέρμα. Η αντίστοιχη θεώρηση ισχύει και για τον τερματικό σταθμό της γραμμής [27].
6. Ο χρόνος που απαιτείται από και προς το αμαξοστάσιο για όλες τις λεωφορειακές γραμμές, θεωρείται πως είναι 30 λεπτά.
7. Ο παράγοντας αξιοποίησης των οδηγών ισούται με το 90% της βάρδιάς τους.
8. Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται για μια τυπική καθημερινή μέρα.

3.2 Μαθηματικό Μοντέλο

Με βάση το μοντέλο των **Andres Grauers, Sven Borén & Oscar Enerbäck**, τη γραφική μέθοδο και όσα αναφέρθηκαν στην παραπάνω ενότητα, θα επεκτείνουμε τη διπλωματική εργασία. Αρχικά, για την εξέταση του διαμορφωμένου μοντέλου έπρεπε να επιλυθεί το βασικό μοντέλο και να εξεταστούν τα περιθώρια διαμόρφωσής του.

Κύριος σκοπός της διαμόρφωσης, ήταν να γίνει υπολογισμός και ανάλυση λειτουργικού κόστους μόνο στην περίπτωση όπου τα ηλεκτρικά λεωφορεία **φορτίζονται** στα αμαξοστάσια **κατά τη διάρκεια της νύχτας**. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα λεωφορεία να μην έχουν τη δυνατότητα να φορτίζονται στους τερματικούς σταθμούς και σε περίπτωση όπου πλησιάζουν το 80% της αυτονομίας τους, να πρέπει να επιστρέψουν στα αμαξοστάσια. Σε αυτό το πλαίσιο διαμόρφωσης, δημιουργήθηκε ένα **σημείο προειδοποίησης** σχετικά με την **αυτονομία** της μπαταρίας κατά τη διάρκεια των προγραμματισμένων λεωφορειών μέσα σε μία τυπική ημέρα. Στη συγκεκριμένη εργασία εξετάζονται δύο γραμμές ως προς το λειτουργικό κόστος και την απόδοσή τους, με σκοπό να εξετασθεί ποιο από τα δύο είδη λεωφορείων είναι οικονομικότερο, καθώς επίσης και εάν η μέθοδος φόρτισης που έχει επιλεγεί για τα ηλεκτρικά λεωφορεία καλύπτει το εύρος δρομολογίων των γραμμών, είτε διανύοντας μεγάλες αποστάσεις είτε μικρές.

Διαμορφώθηκε, έτσι, ένα σύστημα μέσω του κώδικα Rust, ο οποίος είναι σε θέση να διαμορφώσει τις λεωφορειακές γραμμές σε περίπτωση ηλεκτρικών και συμβατικών λεωφορείων. Στόχος του μαθηματικού μοντέλου που σχεδιάστηκε, είναι με τη βοήθεια των αρχείων μέσω του **O2Hub**, τη λεωφορειακή γραμμή ενδιαφέροντος και τη χρήση διάφορων παραμέτρων και παραδοχών, να πραγματοποιείται **λειτουργική κοστολόγηση** οποιασδήποτε λεωφορειακής γραμμής του ΟΑΣΑ, καθώς και ο υπολογισμός των οχηματοχιλιομέτρων αλλά και των ανθρωποωρών αυτής. Τα στοιχεία που αντλούνται από τα αρχεία του **O2Hub**, αναφέρουν τα συνολικά μήκη διαδρομών, την ώρα άφιξης σε κάθε στάση, καθώς και την ώρα αναχώρησης από αυτή, της διαδρομής, αλλά και των κωδικό αριθμό της γραμμής. Επίσης, γίνεται αναφορά στην **προειδοποίηση αυτονομίας** των ηλεκτρικών λεωφορείων, όπου με βάση τα δεδομένα στοιχεία που έχουν εισαχθεί, βοηθά το σύστημα να δει έγκαιρα ποιες γραμμές και ποια δρομολόγια αντιμετωπίζουν πρόβλημα αυτονομίας και χρειάζεται να επιστρέφουν έγκαιρα στα αμαξοστάσια. Σύμφωνα με την προειδοποίηση της αυτονομίας, πραγματοποιείται μια **αναδιάταξη των προγραμματισμένων δρομολογίων**, είτε προσθέτοντας επιπλέον, είτε διαμορφώνοντας τα ήδη υπάρχοντα. Δίνεται, επιπλέον η δυνατότητα δημιουργίας ενός διαγράμματος το οποίο απεικονίζει τις αναχωρήσεις μιας γραμμής μέσα σε μία μέρα, καθώς επίσης και ενός διαγράμματος που απεικονίζει πόσα λεωφορεία βρίσκονται εν κινήσει κατά τη διάρκεια της ημέρας. Παρακάτω, παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο που διαμορφώθηκε σύμφωνα με τα σύνολα, τις παραμέτρους, τις μεταβλητές και τις παραδοχές που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

Πίνακας 2: Μαθηματικό Μοντέλο

$$dist_{Line}(b_x) = |T_G(b_x)| \times dist_G + |T_R(b_x)| \times dist_R \quad (1)$$

$$dist_{Total}(b_x) = dist_{Line}(b_x) + dist_{Pull}(b_x) \quad (2)$$

$$dist_{Pull}(b_x) = 0,2 \times [(1 + 2 \times |T_{H_G}(b_x)|) \times dist_G + (1 + 2 \times |T_{H_R}(b_x)|) \times dist_R] \quad (3)$$

$$dist_{Total} = \sum_x dist_{Total}(b_x) \quad (4)$$

$$dur_G(b_x, t_y) = \sum_{z=1}^{|S_G|} [h(b_x, t_y, s_{z+1}) - h(b_x, t_y, s_z)] \quad (5)$$

$$dur_R(b_x, t_y) = \sum_{z=1}^{|S_R|} [h(b_x, t_y, s_{z+1}) - h(b_x, t_y, s_z)] \quad (6)$$

$$dur_{Line}(b_x) = \sum_{y=1}^{|T_G(b_x)|} dur_G(b_x, t_y) + \sum_{y=1}^{|T_R(b_x)|} dur_R(b_x, t_y) \quad (7)$$

$$dur_{Total}(b_x) = dur_{Line}(b_x) + 2 \times (1 + |T_{H_R}(b_x)| + |T_{H_G}(b_x)|) \times 30 \quad (8)$$

$$dur_{Total} = \sum_x dur_{Total}(b_x) \quad (9)$$

$$dur_{Paid} = \frac{dur_{Total}}{U} \quad (10)$$

$$C_{Dr} = DHW \times dur_{Paid} \quad (11)$$

$$C_{DrFinal} = \frac{N \times C_{Dr}}{dist_G + dist_R} \quad (12)$$

$$C_{En} = dist_{Total} \times P_{En} \quad (13)$$

$$C_{EnFinal} = \frac{N \times C_{En}}{dist_G + dist_R} \quad (14)$$

Αρχικά, υπολογίζεται η απόσταση που διένυσε ένα όχημα πάνω στη γραμμή, χωρίς να προσμετρώνται και οι αποστάσεις από και προς το αμαξοστάσιο, παρά μόνο αθροίζοντας όλα τα μήκη διαδρομών από την αφετηρία στο τέρμα («πήγαινε») και από το τέρμα στην αφετηρία («έλα») που αντιστοιχούν σε όλα τα δρομολόγια που εκτελεί ένα όχημα κατά τη διάρκεια της ημέρας **(1)**.

Υπολογίζεται, ύστερα, η συνολική απόσταση που διένυσε ένα όχημα πάνω στη γραμμή για τη δεδομένη μέρα, συμπεριλαμβανομένων και των αποστάσεων από και προς το αμαξοστάσιο **(2)**. Η απόσταση της γραμμής από και προς το αμαξοστάσιο θεωρείται πως ισούται με το 20% του μήκους διαδρομής «πήγαινε», καθώς και του 20% του μήκους διαδρομής «έλα». Στον συγκεκριμένο υπολογισμό, λόγω της παραδοχής που έχει γίνει για τα κρυφά δρομολόγια, όπου χρειάζεται, προστίθεται, επιπλέον, και η απόσταση, από και προς το αμαξοστάσιο, των κρυφών δρομολογίων **(3)**. Έτσι, προκύπτει η συνολική οδηγηθείσα απόσταση της γραμμής, η οποία ισούται με το άθροισμα των αποστάσεων που διένυσαν όλα τα οχήματα που χρησιμοποιήθηκαν για να εξυπηρετήσουν την λεωφορειακή γραμμή, κατά τη διάρκεια μιας τυπικής καθημερινής μέρας **(4)**.

Αντίστοιχα, πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί που αφορούν τον χρόνο οδήγησης μιας γραμμής. Αρχικά, διενεργείται ο υπολογισμός του χρόνου που οδηγήθηκε ένα όχημα πάνω στη γραμμή για ένα και μόνο ένα δρομολόγιο «πήγαινε» και αντίστοιχα για ένα και μόνο δρομολόγιο «έλα», αθροίζοντας τη διαφορά της ώρας διελεύσεων του συγκεκριμένου οχήματος από στάση σε στάση **(5) & (6)**. Έτσι, για τον χρόνο όλων των δρομολογίων του οχήματος της γραμμής υπολογίζεται ως το άθροισμα των χρόνων όλων των δρομολογίων που εκτελεί το συγκεκριμένο όχημα και έπειτα, ο συνολικός χρόνος οδήγησης προκύπτει από το άθροισμα του χρόνου όλων των δρομολογίων της γραμμής, καθώς και του χρόνου των δρομολογίων από και προς το αμαξοστάσιο, συμπεριλαμβανομένων των «κρυφών» δρομολογίων όπου υπάρχουν **(7) & (8)**. Τέλος, ο συνολικός χρόνος οδήγησης που εκτελεί μια λεωφορειακή γραμμή κατά της διάρκεια της ημέρας, ισούται με το άθροισμα του χρόνου οδήγησης όλων των λεωφορείων και όλων των δρομολογίων που εξυπηρετούν τη γραμμή **(9)**.

Το ημερήσιο κόστος του οδηγού προκύπτει αφού πρώτα υπολογισθεί ο χρόνος πληρωμής αυτού. Για τους οδηγούς λαμβάνεται υπόψιν το διάλειμμα που κάνουν κατά τη διάρκεια της βάρδιάς τους, για αυτό χρησιμοποιείται ένας παράγοντας αξιοποίησης **(10) & (11)**. Αντίστοιχα, το ημερήσιο κόστος ενέργειας / καυσίμων υπολογίζεται ως το γινόμενο της συνολικής οδηγηθείσας απόστασης της γραμμής με το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας / καυσίμων **(13)**. Τέλος, πραγματοποιείται κανονικοποίηση και ετησιοποίηση των παραπάνω λειτουργικών κοστών **(12) & (14)**.

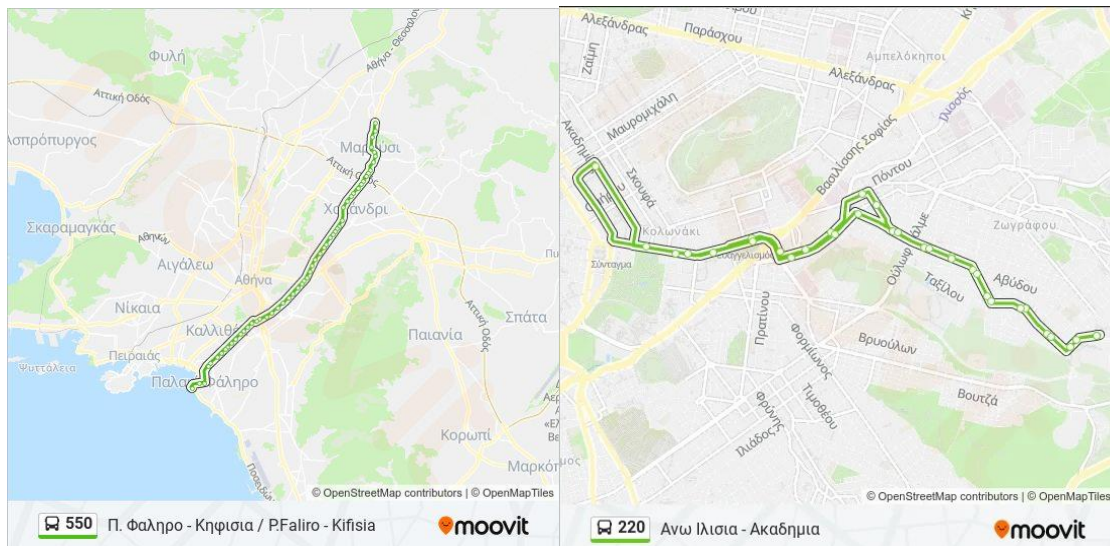
4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται μια παρουσίαση δεδομένων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του παρακάτω αριθμητικού παραδείγματος. Με αυτόν τον τρόπο θα αξιολογηθεί η αξιοπιστία και η αποτελεσματικότητα του μοντέλου. Έπειτα, γίνεται η ανάλυση του μοντέλου, η επίλυση αυτού και παρουσιάζονται τα αποτελέσματά του. Το μαθηματικό μοντέλο προγραμματίστηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Rust.

4.2 Αριθμητικό Παράδειγμα

Το αστικό λεωφορειακό δίκτυο της Αθήνας αποτελείται από 258 γραμμές με χιλιομετρικό δίκτυο 5.781χλμ, που εξυπηρετούν τις μετακινήσεις από τις προαστιακές προς τις κεντρικές περιοχές της πρωτεύουσας, καθώς και τις μετακινήσεις από και προς τους σταθμούς του μετρό [25]. Επίσης, προσφέρει υπηρεσίες σύνδεσης με τον Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών. Στόχος είναι, σταδιακά, τα συμβατικά λεωφορεία που εξυπηρετούν το δίκτυο να αντικατασταθούν με ηλεκτρικά από το τρέχον έτος, με στόχο την περιβαλλοντική ανεξαρτησία και κατ' επέκταση τη μείωση των ρύπων.



Σχήμα 4: Πορεία διαδρομών λεωφορειακών γραμμών 550 Π. Φάληρο – Κηφισιά & 220 Άνω Ιλίσια – Ακαδημία

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκαν δύο χαρακτηριστικά αντίθετες λεωφορειακές γραμμές. Η γραμμή 550 (Π. Φάληρο – Κηφισιά) αποτελείται από 56 σταθμούς. Αναχωρεί από την Αφετηρία 550 «Παλιό Φάληρο» και τερματίζει στο σταθμό Τέρμα «Πλ. Πλατάνου» και η διάρκεια ταξιδιού είναι περίπου 70 λεπτά, διανύοντας κατά προσέγγιση 20 χιλιόμετρα ανά κατεύθυνση. Διασχίζει την πόλη από τα βόρεια προάστια μέχρι τα νότια, περνώντας από σημαντικούς οδικούς άξονες, όπως η Λεωφόρος

Κηφισίας, η Βασιλίσσης Σοφίας και η Λεωφόρος Συγγρού. Θεωρείται μία από τις σημαντικότερες γραμμές της Αθήνας, καθώς καλύπτει μεγάλες και πυκνοκατοικημένες περιοχές, περνώντας από σημαντικούς κόμβους όπως το Μαρούσι, το Χαλάνδρι, το Ψυχικό και φτάνοντας μέχρι τη νότια περιοχή του Παλαιού Φαλήρου. Η γραμμή 220 (Ανω Ιλίσια – Ακαδημία) αποτελείται από 33 σταθμούς και σε μια πλήρη διαδρομή (από την αφετηρία ως το τέρμα και αντίστροφα) διανύει περίπου 6,5 χιλιόμετρα σε 35 λεπτά για κάθε κατεύθυνση. Είναι μία κυκλική γραμμή όπου ξεκινάει και καταλήγει πάντα στη στάση Αφετηρία (Ζωγράφου). Εξυπηρετεί την περιοχή των Ιλισίων και περνάει από κεντρικούς δρόμους της πόλης, όπως η Ούλωφ Πάλμε, η Παπαδιαμαντοπούλου και η Πανεπιστημίου. Ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες δύο γραμμές είναι γιατί θέλαμε να παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα μίας χαρακτηριστικά μεγάλης γραμμής και μίας χαρακτηριστικά γραμμής και μετέπειτα να συγκρίνουμε τις διαφορές τους. Επίσης, μέσα σε αυτό το εύρος, είναι πιο εύκολο να σχηματιστεί, σε πρώτο στάδιο, μια ικανοποιητική εικόνα οικονομικής σύγκρισης των γραμμών και των τρόπων λειτουργίας αυτών.

Αναλύοντας τις λεωφορειακές γραμμές σε συμβατική και σε ηλεκτρική περίπτωση λειτουργίας, παρατηρείται ότι οι ανάγκες των δύο παραπάνω γραμμών διαφέρουν σε σημαντικό βαθμό. Αρχικά, η γραμμή 550 εξυπηρετεί πολλούς επιβάτες που χρειάζονται μια μετακίνηση μεγάλων αποστάσεων από τα βόρεια στα νότια προάστια και αντίστροφα. Είναι μια γραμμή που συνδέει πολλαπλές περιοχές και είναι κατάλληλη για όσους πρέπει να διασχίσουν την πόλη. Αντίθετα, η γραμμή 220 στοχεύει σε τοπικές μετακινήσεις, κυρίως για φοιτητές και κατοίκους των περιοχών γύρω από τα Ιλίσια και του Ζωγράφου που επιθυμούν να φτάσουν στο κέντρο της Αθήνας. Αναφορικά με την κατανάλωση των καυσίμων, η πρώτη γραμμή απαιτεί περισσότερα καύσιμα ανά κατεύθυνση, λόγω του μεγάλου εύρους της, των δρόμων των οποίων διανύει στο πέρασμά της, συμπεριλαμβανομένου της κίνησης αυτών, που μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την αποδοτικότητα των καυσίμων. Επιπλέον, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη για την κατανάλωσή τους, οι συχνές στάσεις για την επιβίβαση και την αποβίβαση των επιβατών, αλλά και το μέγεθος του λεωφορείου, το οποίο υπολογίζεται στα 24 μέτρα. Αντίθετα, η δεύτερη γραμμή, πέραν του ότι έχει πολύ μικρότερο εύρος να διανύσει, έχει και μικρότερο μέγεθος, στα 12 μέτρα, γεγονός το οποίο απαιτεί αυτόματα και λιγότερη κατανάλωση καυσίμων, καθώς το βάρος που καλείται να κυκλοφορήσει είναι περίπου το μισό από αυτό της πρώτης γραμμής. Επίσης, εξυπηρετεί βραχυπρόθεσμες αποστάσεις, λόγω του τοπικού χαρακτήρα της, και άρα μπορεί να καλύψει περισσότερα δρομολόγια με λιγότερη κατανάλωση, ακόμα και στις ώρες αιχμής, όπου η κίνηση που καλούνται να αντιμετωπίσουν και οι δύο γραμμές δεν διαφέρουν σημαντικά.

Αναφορικά με τα είδη λεωφορείων που χρησιμοποιούν, η γραμμή 550 αξιοποιεί θερμικά λεωφορεία τύπου EURO II και EURO IV μήκους 18 μέτρων, ενώ η γραμμή 220 χρησιμοποιεί θερμικά λεωφορεία τύπου EURO II, EURO III, EURO V και EURO VI. Και οι δύο γραμμές απασχολούν ηλεκτρικά λεωφορεία 12 μέτρων τύπου EURO VI. Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζεται ο διαθέσιμος στόλος θερμικών και ηλεκτρικών λεωφορείων του ΟΑΣΑ που απασχολεί τις δύο λεωφορειακές γραμμές.

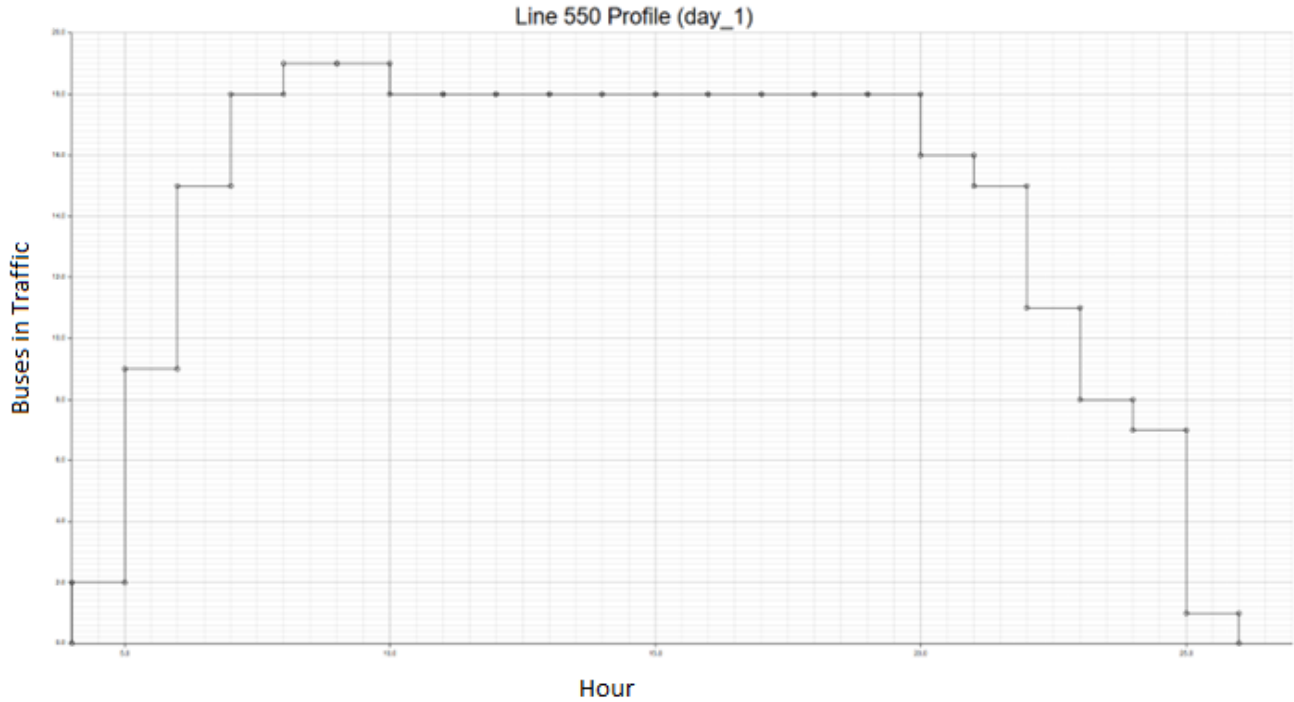
Γραμμή 220	Γραμμή 550	Μοντέλο	Τύπος	Μήκος (m)	Πρότυπο Εκπομπής
	✓	Mercedes-Benz-ΕΛΒΟ Ο405GN	Θερμικό	18	Euro II YMI-1000 - YMI-1219
	✓	Volvo B7LA Saracakis "Αθηνά"	Θερμικό	18	Euro II YMI-1420 - YMI-1539
✓		Mercedes-Benz-ΕΛΒΟ C97.405N	Θερμικό	12	Euro II YMI-1540 - YMI-1729
✓		Mercedes-Benz-ΕΛΒΟ C99.405N	Θερμικό	12	Euro II YMI-1730 - YMI-1749
	✓	Solaris Urbino 18	Θερμικό	18	Euro IV YNN 9821 - YNN 9920 +1 YNN 9940
✓	✓	Yutong E12	Ηλεκτρικό	12	Euro VI ZNK 9801 - ZNK 9940

Πίνακας 4.2.1: Τύποι λεωφορείων ΟΑΣΑ που εξυπηρετούν τις γραμμές 550 & 220

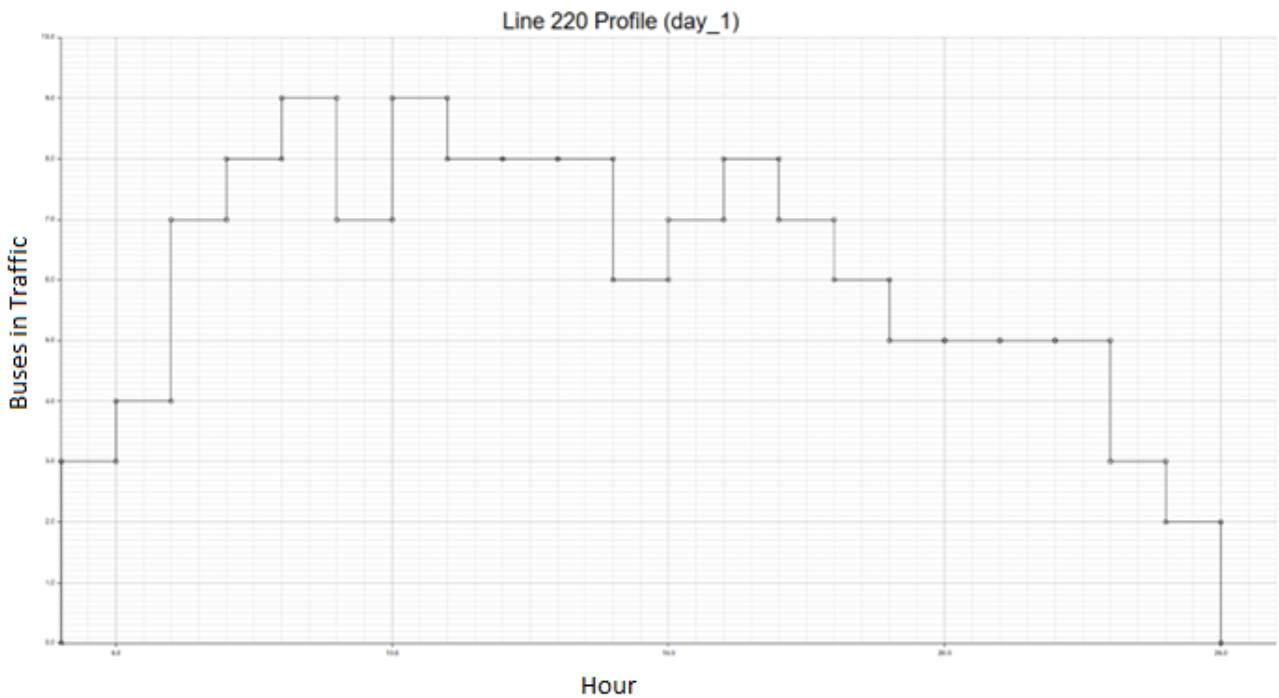
Τα πιο βασικά στοιχεία που συλλέχθηκαν για τη συγκεκριμένη ανάλυση προέρχονται από το **O2Hub, Open Data & Open API Hub**. Η συγκεκριμένη πλατφόρμα πραγματοποιεί συλλογή, διαθέτοντας δεδομένα που προκύπτουν από την καθημερινή λειτουργία δημόσιων επιχειρήσεων, αποτελώντας έτσι **ψηφιακό κόμβο ελεύθερης πρόσβασης** σε συλλογή ανοιχτών δεδομένων που αφορούν φορείς της χώρας. Ο ΟΑΣΑ συμμετέχει ενεργά στη συγκεκριμένη πλατφόρμα, παρέχοντας 10 σύνολα ανοιχτών δεδομένων που αφορούν τις Συγκοινωνίες Αθηνών, εκ των οποίων το ένα αφορά τα δρομολόγια οδικών συγκοινωνιών. Η τακτική εξαγωγή αρχείων περιγραφής του συγκοινωνιακού δικτύου και των αναλυτικών προγραμματισμένων δρομολογίων ανά γραμμή και στάση προέρχεται μέσω της Τηλεματικής. Το συγκεκριμένο έργο αφορά ένα σύστημα διαχείρισης στόλου αλλά και πληροφόρησης επιβατών για λεωφορεία και τρόλεϊ, στοχεύοντας στη βελτιστοποίηση απόδοσης και ποιότητας του συγκοινωνιακού έργου που παρέχεται στους πολίτες [25].

Δεδομένα, λοιπόν που συλλέχθηκαν από το O2Hub, αφορούν τα δεδομένα της γραμμής, καθώς και των χρόνων διελεύσεων στις στάσεις. Γνωρίζοντας το line id κάθε λεωφορειακής γραμμής, καθώς και τους χρόνους διελεύσεων από κάθε στάση, προκύπτει ένα διάγραμμα κίνησης για κάθε λεωφορειακή γραμμή ξεχωριστά, το οποίο δείχνει πόσα λεωφορεία βρίσκονται εν κινήσει κατά τη

διάρκεια της ημέρας. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για μία τυπική καθημερινή μέρα, όπου στη συγκεκριμένη μελέτη επιλέχθηκε να είναι η **day_1**. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα προφίλ των δύο εξεταζόμενων λεωφορειακών γραμμών.



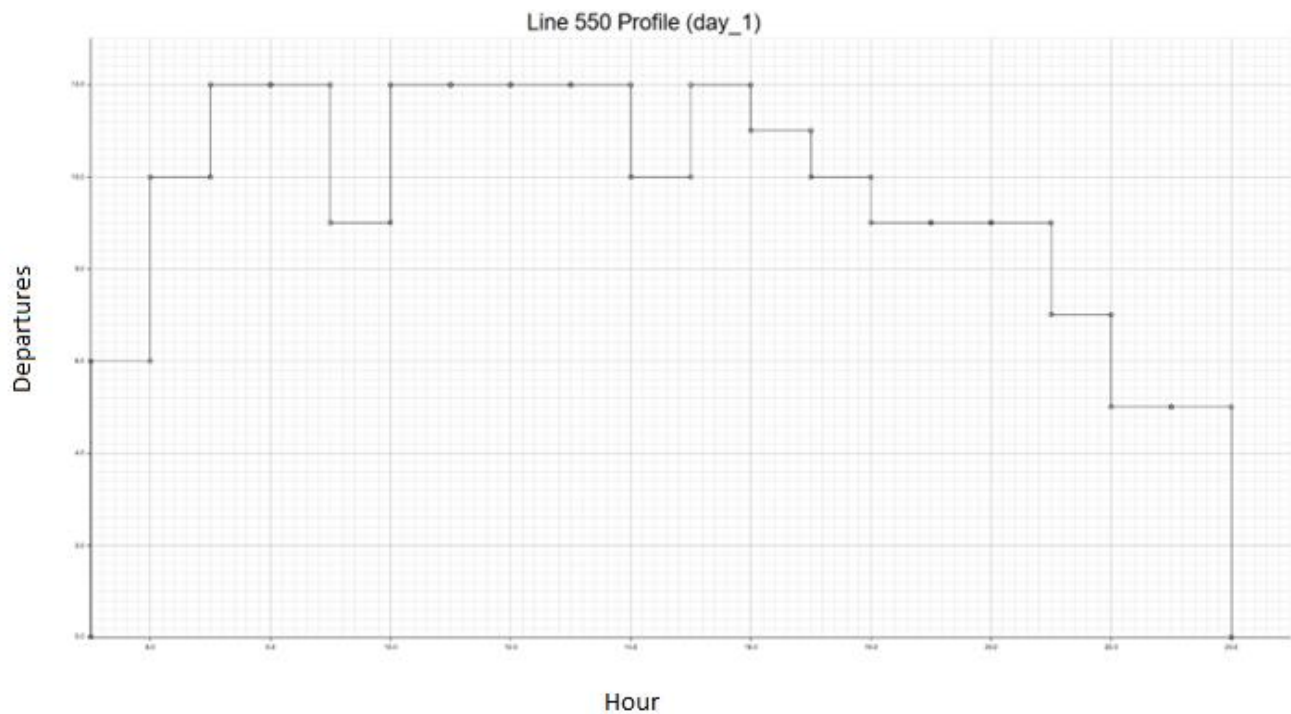
Εικόνα 4.2-1: Διάγραμμα κίνησης λεωφορειακής γραμμής 550.



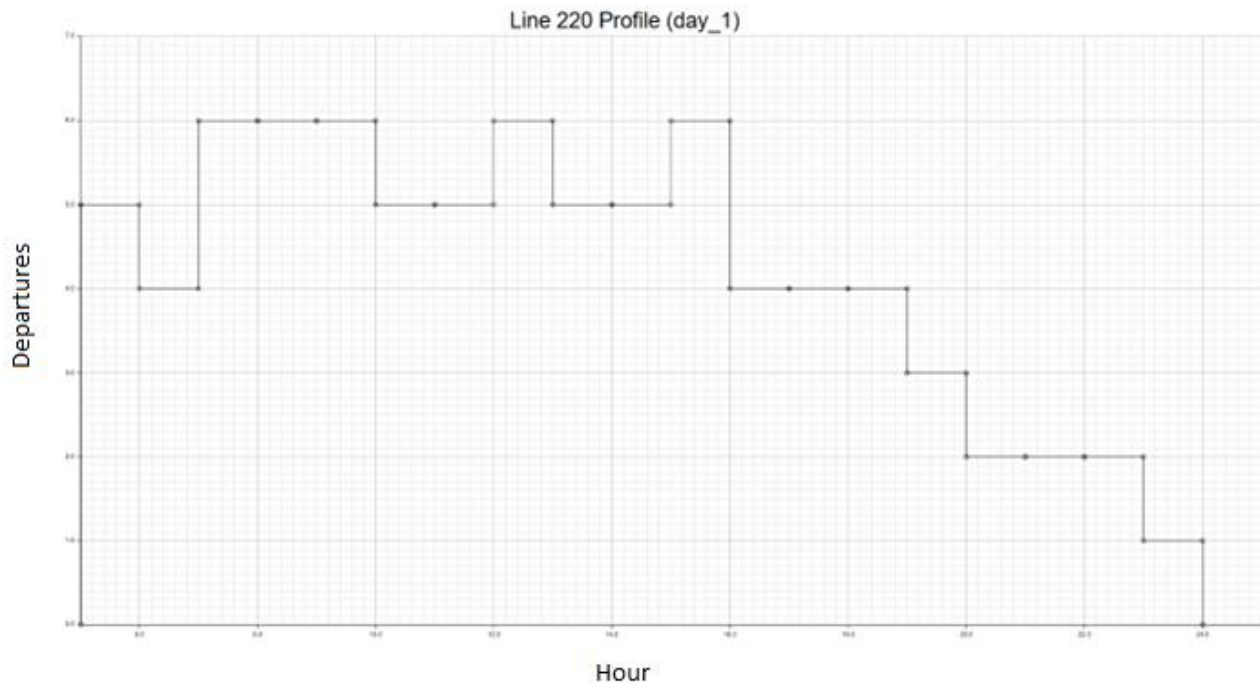
Εικόνα 4.2-2: Διάγραμμα κίνησης λεωφορειακής γραμμής 220.

Από την Εικόνα 4.2-1, διακρίνεται πως για τη λεωφορειακή γραμμή 550, τα περισσότερα λεωφορεία που βρίσκονται εν κινήσει και εξυπηρετούν τη γραμμή, είναι 19 και διαφαίνονται από τις 08:00 έως τις 10:00. Στο μεγαλύτερο μέρος της ημέρας φαίνεται να καλύπτουν τη γραμμή 18 λεωφορεία, τις ώρες 07:00 έως 08:00 και 10:00 έως 20:00. Από την Εικόνα 4.2-2 διακρίνεται πως οι ώρες αιχμής της λεωφορειακής γραμμής 220 είναι από τις 08:00 έως τις 09:00 και από τις 10:00 έως τις 11:00, όπου η γραμμή εξυπηρετείται από 9 λεωφορεία. Τα αμέσως περισσότερα οχήματα που καλύπτουν τη γραμμή είναι 8 και διακρίνονται κατά τις ώρες 07:00 έως 08:00, 11:00 έως 14:00 και 16:00 έως 17:00.

Επιπλέον, δημιουργείται και ένα διάγραμμα αναχωρήσεων κάθε λεωφορειακής γραμμής μέσα στην ημέρα, όπου απεικονίζει πόσα λεωφορεία αναχωρούν ανά μία ώρα. Όπως φαίνεται και παρακάτω, για τη γραμμή 550 οι περισσότερες αναχωρήσεις γίνονται κατά τις ώρες 07:00 με 09:00, 10:00 με 14:00 και 15:00 με 16:00, ενώ για τη γραμμή 220 οι περισσότερες αναχωρήσεις γίνονται κατά τις ώρες 07:00 με 10:00, 12:00 με 13:00 και 15:00 με 16:00.



Εικόνα 4.2-3: Διάγραμμα αναχωρήσεων λεωφορειακής γραμμής 550.



Εικόνα 4.2-4: Διάγραμμα αναχωρήσεων λεωφορειακής γραμμής 220.

Επίσης, μέσω της γραφικής μεθόδου προέκυψαν διαγράμματα που παρουσιάζονται στο Παράρτημα Γραφικής Μεθόδου, σελ. 60 & 62 της παρούσας εργασίας, για τις δύο λεωφορειακές γραμμές, τα οποία ισχύουν και στις δύο περιπτώσεις λεωφορείων, βάσει των ισχυόντων προγραμματισμένων δρομολογίων. Από τα παρακάτω διαγράμματα προκύπτει ότι η γραμμή 550 αξιοποιεί 19 λεωφορεία την ημέρα, εκ των οποίων ένα εκτελεί τα περισσότερα δρομολόγια 14 δρομολόγια και ένα εκτελεί τα λιγότερα, 3 δρομολόγια. Όσον αφορά τη γραμμή 220, αξιοποιεί 9 λεωφορεία την ημέρα, εκ των οποίων ένα εκτελεί τα περισσότερα δρομολόγια 14 δρομολόγια και ένα εκτελεί τα λιγότερα, 4 δρομολόγια.

4.2.1 Περίπτωση 1^η – Συμβατικά Λεωφορεία

Αρχικά, αναλύθηκαν τα λειτουργικά κόστη των λεωφορειακών γραμμών στην περίπτωση συμβατικών λεωφορείων. Για τον υπολογισμό του κόστους, χρησιμοποιήθηκαν και για τις δυο λεωφορειακές γραμμές τα δεδομένα που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Τιμή Καυσίμων (€/lt)	Κατανάλωση Καυσίμων (lt/km)	Ωρομίσθιο οδηγών (€/hr)	Παράγοντας αξιοποίησης οδηγών
1,07	0,33	11,13	0,9

Πίνακας 4.2.2: Δεδομένα υπολογισμού κόστους λειτουργίας σε περίπτωση συμβατικών λεωφορείων.

Η τιμή των καυσίμων ορίστηκε να είναι 1,07 €/lt σύμφωνα με τις τιμές υγρών καυσίμων ΕΛ.ΠΕ., ενώ η μέση κατανάλωση των καυσίμων ορίστηκε στα 0,33 lt/km σύμφωνα με ανάλογες μελέτες που ανέλυσαν την κατανάλωση θερμικών λεωφορείων ανάλογων μοντέλων με τα εξεταζόμενα στην παρούσα έρευνα. Στην αναφορά του ΟΑΣΑ με τίτλο «Μελέτη / εμπειρογνωμοσύνη αξιολόγησης υφιστάμενου συγκοινωνιακού δικτύου και προδιαγραφής παρεμβάσεων για την ανάπτυξη των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς – Φάση Α – Ανάλυση και Αξιολόγηση Υφιστάμενης Κατάστασης» δηλώνεται πως το κόστος των οδηγών ανέρχεται στα 89,07 €/βάρδια. Υποθέτοντας ότι μια βάρδια ισούται με 8 ώρες, προκύπτει το ωρομίσθιο των οδηγών, το οποίο υπολογίζεται στα 11,13 €/ώρα. Τέλος, λαμβάνεται υπόψιν ένας παράγοντας αξιοποίησης των οδηγών, ο οποίος προκύπτει 0,9 , θεωρώντας έτσι πως αν από μια βάρδια εξαιρεθούν τα διαλείμματα, ο καθαρός χρόνος εργασίας των οδηγών είναι το 90% του συνολικού οχταώρου.

Από τα παραπάνω δεδομένα και με βάση τους χρόνους διελεύσεων των λεωφορείων από τις στάσεις, προέκυψαν για μια τυπική καθημερινή ημέρα τα παρακάτω αποτελέσματα, για τις εξεταζόμενες λεωφορειακές γραμμές 550 και 220:

ΓΡΑΜΜΗ 550	
Συνολικός χρόνος οδηγού	12D15H6M59S
Συνολικά οχηματοχιλιόμετρα ανά ημέρα	4.014,00
Ετήσιο κόστος οδηγού (€/km)	56.346,41
Ετήσιο κόστος καυσίμων (€/km)	21.437,46

Πίνακας 4.2.3: Αποτελέσματα κόστους λειτουργίας λεωφορειακής γραμμής 550 σε περίπτωση συμβατικών λεωφορείων.

ΓΡΑΜΜΗ 220	
Συνολικός χρόνος οδηγού	4D16H57M58S
Συνολικά οχηματοχιλιόμετρα ανά ημέρα	914,00
Ετήσιο κόστος οδηγού (€/km)	43.352,42
Ετήσιο κόστος καυσίμων (€/km)	10.073,83

Πίνακας 4.2.4: Αποτελέσματα κόστους λειτουργίας λεωφορειακής γραμμής 220 σε περίπτωση συμβατικών λεωφορείων.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι ο συνολικός χρόνος απασχόλησης οδηγών ανά ημέρα για τη λεωφορειακή γραμμή 550, υπολογιζόμενο σε ανθρωπομέρες και ανθρωποώρες, είναι 12 ημέρες 15 ώρες 6 λεπτά και 59 δευτερόλεπτα, ενώ για τη λεωφορειακή γραμμή 220 είναι 4 ημέρες 16 ώρες 57 λεπτά και 58 δευτερόλεπτα, περίπου δηλαδή από το ένα τρίτο από τον χρόνο απασχόλησης οδηγών της γραμμής 550. Τα συνολικά οχηματοχιλιόμετρα που καλύπτονται ανά ημέρα για την πρώτη γραμμή προκύπτουν 4.014, ενώ για τη

δεύτερη 914. Επίσης, το ετήσιο κόστος του οδηγού υπολογίστηκε για τη γραμμή 550 στα 56.346,41 €/km, ενώ για τη γραμμή 220 στα 43.352,42 €/km. Τέλος, το ετήσιο κόστος καυσίμων για την γραμμή 550 ανέρχεται στα 21.437 €/km, ενώ για τη γραμμή 220 στα 10.073,83 €/km. Από τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρείται ότι αν και το ετήσιο κόστος του οδηγού δεν έχει μεγάλη διαφορά ανάμεσα στις δύο εξεταζόμενες γραμμές, το ετήσιο κόστος καυσίμων διαφέρει σε σημαντικό βαθμό, ξεπερνώντας η γραμμή 550 τα διπλάσια έξοδα της γραμμής 220.

4.2.2 Περίπτωση 2^η – Ηλεκτρικά Λεωφορεία

Έχοντας βγάλει αποτελέσματα για τα λειτουργικά κόστη των συμβατικών λεωφορείων, επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός των αντίστοιχων εξόδων για την περίπτωση ηλεκτρικών λεωφορείων. Αρχικός στόχος σε αυτή την περίπτωση είναι να εξετασθεί εάν και κατά πόσο διαφέρουν τα λειτουργικά έξοδα στην περίπτωση αντικατάστασης των συμβατικών λεωφορείων με ηλεκτρικά. Έπειτα, κύριο ερώτημα που πρέπει να απαντηθεί είναι εάν η αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων επαρκεί στις εξεταζόμενες λεωφορειακές γραμμές. Για τους υπολογισμούς αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Τιμή Ενέργειας (€/kWh)	Μέση Κατανάλωση Ενέργειας (kWh/km)	Αυτονομία οχήματος (km)	Ωρομίσθιο οδηγών (€/hr)	Παράγοντας αξιοποίησης οδηγών
0,081	0,74	300	11,13	0,9

Πίνακας 4.2.5: Δεδομένα υπολογισμού κόστους λειτουργίας σε περίπτωση ηλεκτρικών λεωφορείων.

Η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίζεται στα 0,081 €/kWh και βασίστηκε στις παρούσες τιμές κιλοβατώρας που ισχύουν στην Ελλάδα. Η μέση κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας για τα εξεταζόμενα λεωφορεία ορίστηκε σε 0,74 kWh/km και βασίστηκε σε αποτελέσματα που προέκυψαν από δοκιμαστικές λειτουργίες δρομολογίων σε λεωφορειακές γραμμές της Αθήνας, στα πλαίσια μελέτης που πραγματοποίησε το τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης με τίτλο «Υπηρεσίες αξιολόγησης προγράμματος πιλοτικής κυκλοφορίας ηλεκτρικών λεωφορείων» τον Νοέμβριο του 2021. Επίσης, η αυτονομία των συγκεκριμένων ηλεκτρικών λεωφορείων θεωρείται πως είναι 300km, στοιχείο που συλλέχθηκε από την ιστοσελίδα του κατασκευαστή κατά την παρουσίαση τεχνικών χαρακτηριστικών του υπό εξέταση μοντέλου. Το ωρομίσθιο των οδηγών παραμένει στα 11,13 €/hr, καθώς επίσης και ο παράγοντας αξιοποίησης οδηγών στα 0,9.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και αξιοποιώντας τα στοιχεία που αφορούν τους χρόνους διελεύσεων των λεωφορείων από τις στάσεις, προέκυψαν για μια τυπική

καθημερινή ημέρα τα παρακάτω αποτελέσματα, για τις εξεταζόμενες λεωφορειακές γραμμές 550 και 220:

ΓΡΑΜΜΗ 550	
Συνολικός χρόνος οδηγού	12D15H6M59S
Συνολικά οχηματοχιλιόμετρα ανά ημέρα	4.014,00
Ετήσιο κόστος οδηγού (€/km)	56.346,41
Ετήσιο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (€/km)	3.617,16

Πίνακας 4.2.6: Αποτελέσματα κόστους λειτουργίας λεωφορειακής γραμμής 550 σε περίπτωση ηλεκτρικών λεωφορείων.

ΓΡΑΜΜΗ 220	
Συνολικός χρόνος οδηγού	4D16H57M58S
Συνολικά οχηματοχιλιόμετρα ανά ημέρα	914,00
Ετήσιο κόστος οδηγού (€/km)	43.352,42
Ετήσιο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (€/km)	1.699,77

Πίνακας 4.2.7: Αποτελέσματα κόστους λειτουργίας λεωφορειακής γραμμής 220 σε περίπτωση ηλεκτρικών λεωφορείων.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι ο συνολικός χρόνος απασχόλησης οδηγών ανά ημέρα για τη λεωφορειακή γραμμή 550 είναι 12 ημέρες 15 ώρες 6 λεπτά και 59 δευτερόλεπτα, ενώ για τη λεωφορειακή γραμμή 220 είναι 4 ημέρες 16 ώρες 57 λεπτά και 58 δευτερόλεπτα, περίπου δηλαδή από το ένα τρίτο από τον χρόνο απασχόλησης οδηγών της γραμμής 550. Τα συνολικά οχηματοχιλιόμετρα που καλύπτονται ανά ημέρα για την πρώτη γραμμή προκύπτουν 4.014, ενώ για τη δεύτερη 914. Επίσης, το ετήσιο κόστος του οδηγού υπολογίστηκε για τη γραμμή 550 στα 56.346,41 €/km, ενώ για τη γραμμή 220 στα 43.352,42 €/km. Τέλος, το ετήσιο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για την γραμμή 550 ανέρχεται στα 3.617,16 €/km, ενώ για τη γραμμή 220 στα 1.699,77 €/km. Από τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρείται ότι αν και το ετήσιο κόστος του οδηγού δεν έχει μεγάλη διαφορά ανάμεσα στις δύο εξεταζόμενες γραμμές, το ετήσιο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας διαφέρει σε σημαντικό βαθμό, έχοντας περίπου διπλάσια διαφορά η γραμμή 550 από τη γραμμή 220.

4.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Από τα παραπάνω αποτελέσματα αξίζει να σχολιασθεί η οικονομική διαφορά που υπάρχει ανάμεσα στα δύο είδη λεωφορείων. Βάσει των αποτελεσμάτων, είναι ξεκάθαρο ότι τα ηλεκτρικά λεωφορεία έχουν πολύ μικρότερο κόστος καυσίμων σε σχέση με τα συμβατικά, γεγονός που σε βάθος χρόνου μπορεί να φέρει μεγάλα οικονομικά κέρδη στους δημόσιους φορείς. Αρχικά, αναλύοντας τη γραμμή 550, προκύπτει ότι στην περίπτωση συμβατικών οχημάτων το ετήσιο κόστος καυσίμων

ανέρχεται στα 21.437,46 €/km, ενώ στην περίπτωση των ηλεκτρικών οχημάτων ανέρχεται μόλις στα 3.617,16 €/km. Παρατηρείται, δηλαδή, διαφορά 17.820,30 €/km. Αντίστοιχα, για τη γραμμή 220 το ετήσιο κόστος καυσίμων, στην περίπτωση συμβατικών λεωφορείων υπολογίστηκε να είναι 10.073,83 €/km, ενώ το ετήσιο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, στην περίπτωση ηλεκτρικών οχημάτων, υπολογίστηκε στα 1.699,77 €/km. Κι εδώ παρατηρείται διαφορά της τάξης των 8.374,06 €/km.

ΓΡΑΜΜΗ 550

Ετήσιο κόστος καυσίμων (€/km)	21.437,46
Ετήσιο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (€/km)	3.617,16
Διαφορά	17.820,30

Πίνακας 4.2.8: Σύγκριση κόστους ενέργειας για τη λεωφορειακή γραμμή 550.

ΓΡΑΜΜΗ 220

Ετήσιο κόστος καυσίμων (€/km)	10.073,83
Ετήσιο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (€/km)	1.699,77
Διαφορά	8.374,06

Πίνακας 4.2.9: Σύγκριση κόστους ενέργειας για τη λεωφορειακή γραμμή 220.

4.2.4 Εξέταση Αυτονομίας Ηλεκτρικών Λεωφορείων

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, στην περίπτωση ηλεκτρικών λεωφορείων εξετάζεται και η αυτονομία των οχημάτων κατά τη διάρκεια της ημέρας, βάσει των παρόντων προγραμματισμένων ημερήσιων δρομολογίων. Στην παρούσα έρευνα η αυτονομία κάθε λεωφορείου βασίζεται στα χιλιόμετρα που δύναται να διανύσει, βάσει των τεχνικών χαρακτηριστικών του συγκεκριμένου μοντέλου που παρουσιάζονται στην ιστοσελίδα του κατασκευαστή (Yutong). Έχοντας ως δεδομένο την αυτονομία στα 300 km και θεωρώντας πως κάθε όχημα που ξεπερνάει το 80% αυτής πρέπει να επιστρέφει στο αμαξοστάσιο, προέκυψαν με εφαρμογή της γραφικής μεθόδου, οι παρακάτω πίνακες για τις υπό ανάλυση λεωφορειακές γραμμές:

ΓΡΑΜΜΗ 550		
	Αριθμός δρομολογίων	Διανυθέντα χιλιόμετρα
Bus_1	10	200
Bus_2	10	200
Bus_3	13	260
Bus_4	14	280
Bus_5	12	240
Bus_6	13	260
Bus_7	3	60
Bus_8	10	200
Bus_9	12	240
Bus_10	10	200
Bus_11	13	260
Bus_12	10	200
Bus_13	13	260
Bus_14	10	200
Bus_15	10	200
Bus_16	10	200
Bus_17	10	200
Bus_18	10	200
Bus_19	10	200
Σύνολο λεωφορείων: 19		

Πίνακας 4.2.10: Αυτονομία λεωφορείων για τη λεωφορειακή γραμμή 550.

ΓΡΑΜΜΗ 220		
	Αριθμός δρομολογίων	Διανυθέντα χιλιόμετρα
Bus_1	11	121
Bus_2	14	154
Bus_3	12	132
Bus_4	4	44
Bus_5	9	99
Bus_6	7	77
Bus_7	11	121
Bus_8	10	110
Bus_9	12	132
Σύνολο λεωφορείων: 9		

Πίνακας 4.2.11: Αυτονομία λεωφορείων για τη λεωφορειακή γραμμή 220.

Από τους παραπάνω πίνακες διαφαίνεται ότι η λεωφορειακή γραμμή 220 δεν αντιμετωπίζει κανένα πρόβλημα αναφορικά με το ζήτημα της αυτονομίας καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Αντίθετα, η γραμμή 550 αντιμετωπίζει πρόβλημα αυτονομίας σε πέντε λεωφορεία που εξυπηρετούν τη γραμμή τη συγκεκριμένη ημέρα, καθώς ξεπερνούν τα 240 km που αντιστοιχούν στο 80% της αυτονομίας τους.

Για την επίλυση του προβλήματος της αυτονομίας, προτάθηκε μια αναδιάταξη των δρομολογίων που εξυπηρετούν τα οχήματα για τη συγκεκριμένη γραμμή, με σκοπό τη βέλτιστη απόδοση των λεωφορείων. Μια πιθανή λύση του προβλήματος είναι οχήματα που δεν έχουν πρόβλημα αυτονομίας, να αναλάβουν επιπλέον δρομολόγια και να διαμοιραστούν έτσι ώστε να μην επιβαρύνεται κανένα όχημα. Με αυτόν τον τρόπο δεν χρειάζεται να προστεθούν επιπλέον λεωφορεία, ούτε και επιπλέον οδηγόι, αφού οι ανθρωποώρες για να λειτουργήσει η γραμμή παραμένουν ίδιες. Επομένως, δεν υπάρχει αλλαγή στα λειτουργικά κόστη της γραμμής, τόσο αναφορικά με τους μισθούς των οδηγών όσο και με τα κόστος ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για την κίνηση των οχημάτων. Παρακάτω, παρουσιάζεται ο πίνακας με το βελτιστοποιημένο καταμερισμό δρομολογίων. Πλέον, το επιπλέον δρομολόγιο του λεωφορείου Bus_3 το εκτελεί το Bus_16, τα δύο επιπλέον δρομολόγια του Bus_4 τα εκτελεί το Bus_18, ενώ το επιπλέον του Bus_6 το εκτελεί το Bus_17. Επίσης, το έξτρα δρομολόγιο από το Bus_11 μεταφέρεται στο Bus_19 και τέλος το επιπλέον δρομολόγιο από το λεωφορείο Bus_13 εκτελείται από το Bus_14. Το βελτιστοποιημένο πρόγραμμα δρομολογίων για τη γραμμή 550 απεικονίζεται και γραφικά στη σελ. 61 της παρούσας εργασίας.

ΓΡΑΜΜΗ 550		
	Αριθμός δρομολογίων	Διανυθέντα χιλιόμετρα
Bus_1	10	200
Bus_2	10	200
Bus_3	12	240
Bus_4	12	240
Bus_5	12	240
Bus_6	12	240
Bus_7	3	60
Bus_8	10	200
Bus_9	12	240
Bus_10	10	200
Bus_11	12	240
Bus_12	10	200
Bus_13	12	240
Bus_14	11	220
Bus_15	10	200
Bus_16	11	220
Bus_17	11	220
Bus_18	12	240
Bus_19	11	220
Σύνολο λεωφορείων: 19		

Πίνακας 4.2.12: Αυτονομία λεωφορείων για τη λεωφορειακή γραμμή 550, **μετά** την αναδιάταξη των δρομολογίων.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ανάλυση του **λειτουργικού κόστους** των **συμβατικών και ηλεκτρικών λεωφορείων** σε λεωφορειακές γραμμές του ΟΑΣΑ, καθώς και την **εξέταση της αυτονομίας των ηλεκτρικών οχημάτων**, αλλά και την **βελτιστοποίηση των προγραμματισμένων δρομολογίων** με στόχο την εξάλειψη του προβλήματος αυτονομίας. Εφόσον ερευνήθηκαν και αναλύθηκαν τα σημαντικότερα σημεία της βιβλιογραφίας, τα οποία αναφέρονται στα εν λόγω ζητήματα, δημιουργήθηκε ένας συνοπτικός πίνακας, ώστε να εντοπισθούν τα κενά της βιβλιογραφίας.

Στο πλαίσιο της ανάλυσης λειτουργικού κόστους και της προειδοποίησης αυτονομίας, δημιουργήθηκε ένα **μαθηματικό μοντέλο**, το οποίο εκφράστηκε και υπολογίστηκε μέσω κώδικα **Rust**. Το μοντέλο που δημιουργήθηκε, βασίστηκε στο μοντέλο των **Andres Grauers, Sven Borén & Oscar Enerbäck (2020)**. Με την πιλοτική επίλυση δύο λεωφορειακών γραμμών, προέκυψε ότι το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να υπολογίσει το βέλτιστο αποτέλεσμα.

Το μαθηματικό μοντέλο που αναλύεται στην παρούσα εργασία, δίνει τη δυνατότητα **εξαγωγής αποτελεσμάτων τόσο για λειτουργικά κόστη όσο και για προειδοποίηση αυτονομίας ηλεκτρικών οχημάτων**. Δημιουργείται άμεσα μια σύγκριση αποτελεσμάτων ανάμεσα στα έξοδα, βοηθώντας έτσι τους φορείς που παρέχουν μέσα μαζικής μεταφοράς, να εξετάσουν άμεσα τα οικονομικά τους συμφέροντα ως προς τη λειτουργία. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα πρόβλεψης οποιασδήποτε δυσλειτουργίας σε οποιαδήποτε λεωφορειακή γραμμή, προλαμβάνοντας έτσι ζητήματα που αφορούν την αυτονομία των ηλεκτρικών λεωφορείων και **βελτιστοποιώντας τα προγραμματισμένα δρομολόγια των γραμμών, τα οποία έχουν δημιουργηθεί με συνθήκες συμβατικών οχημάτων**.

Από το παραπάνω μαθηματικό μοντέλο προκύπτουν για τη λεωφορειακή γραμμή **550 Π. Φάληρο – Κηφισιά**, τα εξής αποτελέσματα:

- 19 λεωφορεία εξυπηρετούν τη γραμμή καθημερινά και στις δύο περιπτώσεις.
- Προέκυψε πρόβλημα αυτονομίας σε 5 λεωφορεία.
- Εκτελούνται 4.014 οχημ/τρα καθημερινά.
- Το ετήσιο κόστος οδηγού ανέρχεται στα 56.346,41€/km και στις δύο περιπτώσεις.
- Το ετήσιο κόστος καυσίμων προκύπτει 21.437,46 €/km, ενώ το ετήσιο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας 3.167,16 €/km.
- Για τη βελτιστοποίηση της αυτονομίας προτάθηκε αναδιάταξη των δρομολογίων στα ήδη υπάρχοντα λεωφορεία, χωρίς προσθήκη επιπλέον.
- Οι απαραίτητες ανθρωποώρες οδηγών παραμένουν ίδιες και άρα δεν μεταβάλλεται το κόστος αυτών.

Για τη γραμμή **220 Άνω Ιλίσια – Ακαδημία**, προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

- 9 λεωφορεία εξυπηρετούν τη γραμμή καθημερινά και στις δύο περιπτώσεις.
- Δεν προκύπτει πρόβλημα αυτονομίας κατά τη λειτουργία των ηλεκτρικών οχημάτων.
- Εκτελούνται 914 οχημ/τρα καθημερινά.
- Το ετήσιο κόστος οδηγού ανέρχεται στα 43.352,42 €/km και στις δύο περιπτώσεις.
- Το ετήσιο κόστος καυσίμων προκύπτει 10.073,83 €/km, ενώ το ετήσιο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας 1.699,77 €/km.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν ύστερα από την εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου, συμπεραίνεται ότι η αντικατάσταση των λεωφορείων εσωτερικής καύσης με ηλεκτρικά, πέραν της περιβαλλοντικής ανεξαρτησίας, μπορεί να επιφέρει οικονομικά οφέλη στους δημόσιους φορείς διάθεσης μέσων μαζικής μεταφοράς. Παρόλα αυτά, η παρούσα στρατηγική φόρτισης που χρησιμοποιείται, δεν ενδείκνυται για λεωφορειακές γραμμές μεγάλου μήκους, παρά μόνο για μικρές ή / και μεσαίες χιλιομετρικά λεωφορειακές γραμμές. Για αυτό το λόγο, θα πρέπει να επανεξετασθεί το σενάριο ταχείας φόρτισης, κατά τη διάρκεια της ημέρας, καθώς και οι συνολικές βελτιστοποιήσεις των δρομολογίων.

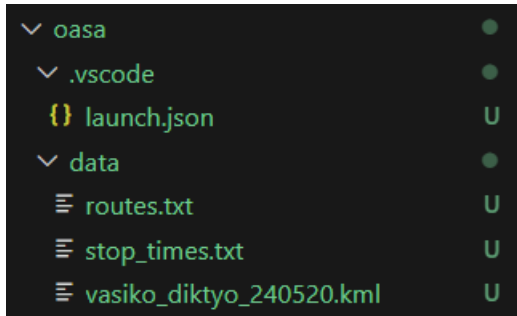
Για μελλοντική έρευνα, προτείνεται η επέκταση του μοντέλου σε περισσότερα δεδομένα που αφορούν τα κόστη των λεωφορειακών γραμμών, όπως τα κόστη συντήρησης, ασφάλειας και λοιπού προσωπικού και στις δύο περιπτώσεις οχημάτων. Επιπλέον, θα ήταν σκόπιμο να πραγματοποιηθεί μια εκτενέστερη ανάλυση και σύγκριση μεταξύ συμβατικών και ηλεκτρικών οχημάτων, εφόσον συμπεριληφθούν δεδομένα σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από τη λειτουργία των λεωφορείων στους αστικούς ιστούς, ώστε να διερευνηθεί κατά πόσο τα ηλεκτρικά οχήματα είναι λιγότερο επιβλαβή για το περιβάλλον αλλά και τον ίδιο τον άνθρωπο. Τέλος, λόγω του ότι η εφαρμογή των ηλεκτρικών λεωφορείων στα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς είναι πρόσφατη προσθήκη, αξίζει να εξετασθεί η εφαρμογή διαφορετικής στρατηγικής φόρτισης, όπως οι σταθμοί ταχείας φόρτισης, οι οποίοι θα προλαμβάνουν το πρόβλημα της αυτονομίας και θα καθιστούν μια βέλτιστη λειτουργία δρομολογίων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

1. Sven Borén, 2019, *Electric buses' sustainability effects, noise, energy use, and costs*, <https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1666324>
2. Sheth, A., Sarkar, D., 2019. Life Cycle Cost Analysis for Electric vs. Diesel Bus Transit in an Indian Scenario. International Journal of Technology. Volume 10(1), pp. 105-115, *Life Cycle Cost Analysis for Electric vs. Diesel Bus Transit in an Indian Scenario*, <https://doi.org/10.14716/ijtech.v10i1.1958>
3. Orhan Topal, Ismail Nakir, *Energies* 2018, 11(9), 2369, *Total Cost of Ownership Based Economic Analysis of Diesel, CNG and Electric Bus Concepts for the Public Transport in Istanbul City*, <https://doi.org/10.3390/en11092369>
4. Jorg Roosen, Wim Marneffe & Lode Vereeck (2015) *A Review of Comparative Vehicle Cost Analysis*. *Transport Reviews*, 35:6, 720-748, DOI: 10.1080/01441647.2015.1052113
5. Jonas Hellgren (2005), *Life cycle cost analysis of a car, a city bus and an intercity bus powertrain for year 2005 and 2020*, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.10.004>
6. Antti Lajunen (2013), *Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses*, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.10.008>
7. D. Göhlich, A. Kunith & T. Ly (2013), *Technology assessment of an electric urban bus system for Berlin*, Department Methods for Product Development and Mechatronics,
8. Technische Universität Berlin, Germany, doi:10.2495/UT140121
9. Lisiana Nurhadi, Sven Borén, Henrik Ny (2014), *A Sensitivity Analysis of Total Cost of Ownership for Electric Public Bus Transport Systems in Swedish Medium Sized Cities*, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.10.058>
10. Oscar Olsson, Anders Grauers, Stefan Petterson (2016), *Method to analyze cost effectiveness of different electric bus systems*, <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1159796&dswid=7720>
11. Aigars Laizāns, Igors Graurs, Aivars Rubenis, George Utehin (2015), *Economic Viability of Electric Public Busses: Regional Perspective*, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.013>
12. Dietmar Göhlich, Tu-Anh Fay, Dominic Jefferies, Enrico Lauth, Alexander Kunith, Xudong Zhang (2017), *Design of urban electric bus systems*, <https://doi.org/10.1017/dsj.2018.10>
13. Anal Sheth, Debasis Sarkar (2018), *Life Cycle Cost Analysis For Electric VS Diesel Bus Transit in an Indian Scenario*, <https://doi.org/10.14716/ijtech.v10i1.1958>
14. Orhan Topal, Ismail Nakir (2018), *Total Cost of Ownership Based Economic Analysis of Diesel, CNG and Electric Bus Concepts for the Public Transport in Istanbul City*, <https://doi.org/10.3390/en11092369>

15. Fabian Meishner, Dirk Uwe Sauer (2019), *Technical and economic comparison of different electric bus concepts based on actual demonstrations in European cities*, <https://doi.org/10.1049/iet-est.2019.0014>
16. Samuel Pelletier, Ola Jabali, Jorge E. Mendoza, Gilbert Laporte (2019), *The electric bus fleet transition problem*, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.10.012>
17. Anders Grauers, Sven Borén, Oscar Enerbäck (2020), *Total Cost of Ownership Model and Significant Cost Parameters for the Design of Electric Bus Systems*, <https://doi.org/10.3390/en13123262>
18. Neil Quarles, Kara M. Kockelman, Moataz Mohamed (2020), *Costs and Benefits of Electrifying and Automating Bus Transit Fleets*, <https://doi.org/10.3390/su12103977>
19. Jakov Topić, Jure Soldo, Filip Maletić, Branimir Škugor, Joško Deur (2020), *Virtual Simulation of Electric Bus Fleets for City Bus Transport Electrification Planning*, <https://doi.org/10.3390/en13133410>
20. Emilia M. Szumska, Marek Pawełczyk, Rafał Jurecki (2022), *Total Cost of Ownership analysis and energy efficiency of electric, hybrid and conventional urban buses*, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
21. Hussein Basma, Marc Haddad, Charbel Mansour, Maroun Nemer (2022), *Evaluation of the techno-economic performance of battery electric buses: Case study of a bus line in Paris*, <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2022.101207>
22. Στυλιανός Δουλγέρης, Αλέξανδρος Ζαφειριάδης, Ζήσης Σαμαράς (2021), *Υπηρεσίες αξιολόγησης προγράμματος πιλοτικής κυκλοφορίας ηλεκτρικών λεωφορείων*, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
23. ΝΑΜΑ ΕΡΑΣΜΟΣ, ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Ε.Π.Ε., ΟΑΣΑ Α.Ε. (2020), *Μελέτη / εμπειρογνωμοσύνη αξιολόγησης υφιστάμενου συγκοινωνιακού δικτύου και προδιαγραφής παρεμβάσεων για την ανάπτυξη των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς – Φάση Α – Ανάλυση και Αξιολόγηση Υφιστάμενης Κατάστασης*
24. Martin Jurkovič, Tomas Skrucany, Tomáš Kalina, Piotr Gorzelańczyk (2020), *Environmental Impacts of Introducing LNG as Alternative Fuel or Urban Buses – Case Study in Slovakia*, <https://doi.org/10.7307/ptt.v32i6.3564>
25. Ο.Α.Σ.Α. Α.Ε. (2022), *Έκθεση Πεπραγμένων Διοικητικού Συμβουλίου*, <https://www.oasa.gr>
26. <https://www.bus.com>
27. <https://www.oasa.gr>
28. European Environment Agency, <https://www.eea.europa.eu>
29. Κανονισμός του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, Στρασβούργο 2023, [REPowerEU](https://www.eea.europa.eu)
30. Yutong – E12, <https://en.yutong.com/>
31. Γενική Γραμματεία Εμπορίου & Προστασίας Καταναλωτή, Τιμές Διυλιστηρίου, <http://oil.gge.gov.gr/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΚΩΔΙΚΑΣ RUST



```
oasa > src > main.rs
1 use std::io::prelude::*;
2 use std::collections::HashMap;
3 use std::str::FromStr;
4 use oasa::io;
5 use oasa::elts::*;
6 use chrono::{prelude::*, Duration};
7
8 0 implementations
9 enum XMLParseStatus {
10     Seeking,
11     Measuring,
12     Done
13 }
14
15 ▶ Run | Debug
16 fn main() {
17     let mut cfg: io::Config = io::parse_args() Result<Config, Error>
18         .expect(msg: "Error parsing arguments");
19     let (
20         line: &str,
21         routes: &mut File,
22         stops: &mut File,
23         dists: &mut File
24     ) = cfg.unwrap();
25     let mut data: String = String::new();
26     routes.read_to_string(buf: &mut data) Result<usize, Error>
27         .expect(msg: "Error reading routes file.");
28     let line_id: &str = data.lines() Lines<'>
29         .filter_map(|l: &str| io::parse_line(inp: l, targ: &line)) impl Iterator<Item = &str>
30         .next() Option<&str>
31         .expect(msg: "Could not find line id.");
32 }
```



```

31 // Good! We now have secured the line id. Time to open
32 // timetables and scan all scheduled rides...
33 let mut stop_data: String = String::new();
34 stops.read_to_string(buf: &mut stop_data) Result<usize, Error>
35     .expect(msg: "Error reading stops file.");
36
37 let mut dist_data: String = String::new();
38 dists.read_to_string(buf: &mut dist_data) Result<usize, Error>
39     .expect(msg: "Error reading distances file.");
40
41 // CAUTION: Distances are measured in METERS!
42 let (mut start_dist: f64, mut end_dist: f64) = (0.0, 0.0);
43 let mut parse_status: XMLParseStatus = XMLParseStatus::Seeking;
44 let mut dist_iter: Lines<'> = dist_data.lines();
45 let mut next_line: Option<&str> = dist_iter.next();
46 while let Some(l: &str) = next_line {
47     match parse_status {
48         XMLParseStatus::Seeking => {
49             if l.contains("<Data name=\"line_id\">") {
50                 dist_iter.next().unwrap();
51                 if dist_iter.next() Option<&str>
52                     .unwrap() &str
53                     .contains(format!("<value>{}</value>", line).as_str())
54                 {
55                     parse_status = XMLParseStatus::Measuring;
56                 }
57             }
58         },

```

```

59         XMLParseStatus::Measuring => {
60             if l.contains("<Data name=\"route_distance\">") {
61                 dist_iter.next().unwrap();
62                 if start_dist == 0.0 {
63                     start_dist = f64::from_str(dist_iter.next() Option<&str>
64                         .unwrap() &str
65                         .split(">") Split<'_, &str>
66                         .skip(1) impl Iterator<Item = &str>
67                         .next() Option<&str>
68                         .unwrap() &str
69                         .split("<") Split<'_, &str>
70                         .next() Option<&str>
71                         .unwrap()) Result<f64, ParseFloatError>
72                         .unwrap();
73                     parse_status = XMLParseStatus::Seeking;
74                 } else {
75                     end_dist = f64::from_str(dist_iter.next() Option<&str>
76                         .unwrap() &str
77                         .split(">") Split<'_, &str>
78                         .skip(1) impl Iterator<Item = &str>
79                         .next() Option<&str>
80                         .unwrap() &str
81                         .split("<") Split<'_, &str>
82                         .next() Option<&str>
83                         .unwrap()) Result<f64, ParseFloatError>
84                         .unwrap();
85                     parse_status = XMLParseStatus::Done;
86                 }
87             }

```

```

88     },
89     _ => { break; }
90 }
91 next_line = dist_iter.next();
92 }
93
94 if end_dist == 0.0 { end_dist = start_dist; }
95
96 // ...and keep just the ones that take place in day_1 of the requested line.
97 let drives_of_interest: Vec<Passage> = stop_data.lines() Lines<'>
98     .filter(|l: &&str| io::parse_stop(inp: *l, targ: line_id)) impl Iterator<Item = &str>
99     .map(|s: &str| { Passage::new(txt: s) }) impl Iterator<Item = Passage>
100     .collect();
101
102 // Recording departures per hour is easy, as long as you remember
103 // that "departing" passages are accordingly marked via their p_id.
104 let departures: (HashMap<u32, u16>, (u16, u32)) = drives_of_interest.iter() Iter<'>, Passage>
105     .filter(|p: &&Passage| { p.is_departure() }) impl Iterator<Item = &Passage>
106     .fold(init: (HashMap::new(), (0, 0)), f: |(mut acc: HashMap<u32, u16>, mut bus_hour: (u16, u32)), s: &Pa...| {
107         let (current_bus: u16, current_max_hour: u32) = bus_hour;
108         let next_bus: u16 = s.get_no();
109         let mut next_observed_hour: u32 = s.get_hour();
110         if next_bus != current_bus {
111             bus_hour.0 = next_bus;
112         } else if next_observed_hour < current_max_hour {
113             next_observed_hour += 24;
114         }
115         bus_hour.1 = next_observed_hour;
116         let entry: &mut u16 = acc.entry(key: next_observed_hour) Entry<'>, u32, u16>
117             .and_modify(|e: &mut u16| { *e += 1 }) Entry<'>, u32, u16>
118             .or_insert(default: 1);
119
120         (acc, bus_hour)
121     }
122 );
123
124 let (start_deps: u16, end_deps: u16): (u16, u16) = departures.0.values() Values<'>, u32, u16>
125     .fold(init: (0, 0), f: |(mut s: u16, mut e: u16), deps_this_hour: &u16| {
126         s += *deps_this_hour / 2;
127         e += *deps_this_hour / 2;
128         if *deps_this_hour % 2 != 0 {
129             if s > e { e += 1; }
130             else { s += 1; }
131         }
132
133         (s, e)
134     }
135 );
136
137 io::plot_departures(data: &(departures.0), &line, is_dep: true);
138
139 let total_trip_distance: f64 = start_deps as f64 * start_dist + end_deps as f64 * end_dist;
140 // CAUTION: We *assume* "20% of trip distance" is a good approximation for distance from depot.
141 let (start_from_depot: f64, depot_from_end: f64) = get_dists_from_depot(s: start_dist, e: end_dist);
142

```

```

143
144 // A similar folding may give us the number of buses in traffic
145 // during the day. But first we must *extend* the drives of interest
146 // so that they include pull-in/out operations.
147 let complete_drives: Vec<Passage> = inject_pullops(raw: drives_of_interest);
148
149 let diffmnt_buses: f64 = complete_drives.iter() Iter<'_, Passage>
150   .filter(|p: &&Passage| { p.is_pullop() }) impl Iterator<Item = &Passage>
151   .fold(init: 0.0, f: |mut acc: f64, _p: &Passage| {
152     acc += 1.0;
153
154     acc
155   }) / 2.0;
156
157 let total_pull_distance: f64 = diffmnt_buses * (start_from_depot + depot_from_end);
158 let total_distance_driven: f64 = total_pull_distance + total_trip_distance;
159
160 let mut it: impl Iterator<Item = &Passage> = complete_drives.iter().peekable();
161 let mut total_driver_time: (NaiveTime, i64) = (NaiveTime::default(), 0);
162 let mut curr_bus: u16 = 0;
163 while let Some(next_pass: &Passage) = it.next() {
164   let next_bus: u16 = next_pass.get_no();
165   if next_bus != curr_bus {
166     curr_bus = next_bus;
167   }
168   if let Some(next_next_pass: &&Passage) = it.peek() {
169     let next_next_bus: u16 = next_next_pass.get_no();
170     if next_next_bus == curr_bus {
171       let backup: (NaiveTime, i64) = total_driver_time;
172       total_driver_time = total_driver_time.0.overflowing_add_signed(
173         next_next_pass.temporal_diff(prev: next_pass) Option<TimeDelta>
174         .unwrap_or(default: Duration::zero()));

```

```

172       total_driver_time = total_driver_time.0.overflowing_add_signed(
173         next_next_pass.temporal_diff(prev: next_pass) Option<TimeDelta>
174         .unwrap_or(default: Duration::zero()));
175     );
176     total_driver_time.1 += backup.1;
177   }
178 }
179
180
181 println("Total driver time: {} days, {} hours, {} minutes and {} seconds", total_driver_time.1 / 86400, total_driver_time.0.hour(), total_driver_time.0.minute(), tot
182
183 let buses_in_traffic: (HashMap<u32, Vec<u16>>, (u16, u32)) = complete_drives.iter() Iter<'_, Passage>
184   .fold(init: (HashMap::new(), (0, 0)), f: |mut acc: HashMap<u32, Vec<u16>>, mut bus_hour: (u16, u32), s:| {
185     let (current_bus: u16, current_max_hour: u32) = bus_hour;
186     let next_bus: u16 = s.get_no();
187     let mut next_observed_hour: u32 = s.get_hour();
188     if next_bus != current_bus {
189       bus_hour.0 = next_bus;
190       bus_hour.1 = next_observed_hour;
191     } else if next_observed_hour < current_max_hour {
192       next_observed_hour += 24;
193     }
194     let entry: &mut Vec<u16> = acc.entry(key: next_observed_hour) Entry<'_, u32, Vec<u16>>
195       .and_modify(|buses: &mut Vec<u16>| {
196         if !buses.contains(&s.get_no()) { buses.push(s.get_no()); }
197       }) Entry<'_, u32, Vec<u16>>
198       .or_insert(default: vec![s.get_no()]);
199
200     //acc.bus_hour

```

```

199     (acc, bus_hour)
200   }
201 );
202
203
204 io::plot_departures(data: &buses_in_traffic.0.iter() Iter<'_, u32, Vec<u16>>
205   .map(|(k: &u32, v: &Vec<u16>)| {
206     ("k, v.len() as u16)
207   }) impl Iterator<Item = (u32, u16)>
208   .collect(), &line, is_dep: false);
209
210 if cfg.is_electric() {
211   let autonomy: f64 = get_autonomy();
212   let buses_at_risk: (Vec<u16>, u16, f64, u8) = complete_drives.iter() Iter<'_, Passage>
213     .filter(|p: &&Passage| p.is_departure()) impl Iterator<Item = &Passage>
214     .fold((init: (vec![], 0, 0.0, 0), f: |(mut probz: Vec<u16>, mut curr_bus: u16, mut curr_dist: f64, mut switch: u8), next_passage: &Passage| {
215       let next_bus: u16 = next_passage.get_no();
216       if next_bus != curr_bus {
217         if curr_bus != 0 &&
218           // CAUTION: This block ignores "hidden" pullops.
219           curr_dist + depot_from_end >= 0.8 * autonomy &&
220           !probz.contains(&curr_bus) {
221           probz.push(curr_bus);
222         }
223         curr_bus = next_bus;
224         curr_dist = start_from_depot;
225       }
226       if switch == 0 { curr_dist += start_dist; switch += 1; }

```

```

226       if switch == 0 { curr_dist += start_dist; switch += 1; }
227       else { curr_dist += end_dist; switch -= 1; }
228
229       if curr_dist >= 0.8 * autonomy && !probz.contains(&curr_bus) { probz.push(curr_bus); }
230
231       (probz, curr_bus, curr_dist, switch)
232     }
233   );
234
235   if !buses_at_risk.0.is_empty() {
236     println!("CAUTION! The following buses exceed 80% of autonomy while on duty:\n{:?}", buses_at_risk.0);
237   }
238 }
239
240 let total_driver_cost: f32 = compute_yearly_driver_cost(rough: total_driver_time);
241 let total_energy_cost: f32 = compute_yearly_energy_cost(tot_dist: total_distance_driven, cfg.is_electric());
242 let driver_cost_per_klm: f32 = total_driver_cost / (((start_dist + end_dist) as f32 / 2.0) as f32) * 1000.0;
243 let energy_cost_per_klm: f32 = total_energy_cost / (((start_dist + end_dist) as f32 / 2.0) as f32) * 1000.0;
244 println!("\nFINAL REPORT:");
245 println!("-----");
246 println!("Total vehicle-kilometers per day: {:.0} vklm", total_distance_driven / 1000.0);
247 println!("Yearly driver cost (amortized to line length): {:.2} euros/klm", driver_cost_per_klm);
248 println!("Yearly fuel cost (amortized to line length): {:.2} euros/klm", energy_cost_per_klm);
249 } fn main
250
251 fn inject_pullops(raw: Vec<Passage>) -> Vec<Passage> {
252   let mut res: Vec<Passage> = raw.clone();
253   // Peekable iterator helps keep track of last trips.
254   let mut runner: impl Iterator<Item = &Passage> = raw.iter().peekable();

```

```

255
256 // Helps keep track of first trips.
257 let mut curr_bus: u16 = 0;
258 // What index does the currently inspected element
259 // have in the resulting structure?
260 let mut idx: usize = 0;
261 while let Some(elt: &Passage) = runner.next() {
262     if elt.get_no() != curr_bus {
263         res.insert(index: idx, element: elt.pull_to_here());
264         idx += 1;
265         curr_bus = elt.get_no();
266     }
267     match runner.peek() {
268         Some(next_elt: &&Passage) => {
269             if next_elt.get_no() != curr_bus {
270                 res.insert(index: idx + 1, element: elt.pull_from_here());
271                 idx += 1;
272             } else if let None = next_elt.temporal_diff(prev: elt) {
273                 // If too big a layover is found, it's interpreted
274                 // as an extra pair of pull operations.
275                 res.insert(index: idx + 1, element: elt.pull_from_here());
276                 idx += 1;
277                 res.insert(index: idx + 1, element: next_elt.pull_to_here());
278                 idx += 1;
279             }
280         },
281         None => {
282             res.insert(index: idx + 1, element: elt.pull_from_here());
283             idx += 1;
284         }
285     }

```

```

285     }
286     idx += 1;
287 }
288
289 res
290 } fn inject_pullops
291
292 fn get_dists_from_depot(s: f64, e: f64) -> (f64, f64) {
293     (0.2 * s, 0.2 * e)
294 }
295
296 fn get_autonomy() -> f64 {
297     //(BATTERY_CAPACITY / EV_MEAN_ENERGY) as f64
298     300_000.0
299 }

```

```

main.rs M  io.rs M X  elts.rs M  stop_times.txt U  vasiko_diktyo_24
oasa > src > lib > io.rs > get_input
1  use std::io::Error;
2  use std::path::PathBuf;
3  use std::fs::File;
4  use std::ffi::OsStr;
5  use std::collections::HashMap;
6
7  1 implementation
8  pub struct Config {
9      line_name: String,
10     route_data: File,
11     stops_data: File,
12     dist_data: File,
13     electric: bool,
14 }
15
16 impl Config {
17     pub fn new(
18         line_name: Option<String>,
19         route_data: Option<File>,
20         stops_data: Option<File>,
21         dist_data: Option<File>,
22         electric: Option<bool>,
23     ) -> Result<Self, Error> {
24         Ok(Self {
25             line_name: line_name.unwrap_or(default: String::from("230")),
26             route_data: route_data.unwrap(),
27             stops_data: stops_data.unwrap(),
28             dist_data: dist_data.unwrap(),
29             electric: electric.unwrap_or(default: true),
30         })
31     }
32 }

```

```

32     pub fn unwrap(&mut self) -> (&str, &mut File, &mut File, &mut File) {
33         (
34             &self.line_name,
35             &mut self.route_data,
36             &mut self.stops_data,
37             &mut self.dist_data,
38         )
39     }
40
41     pub fn is_electric(&self) -> bool {
42         self.electric
43     }
44 } impl Config
45
46 0 implementations
47 enum InpKind {
48     Route,
49     Stops,
50     Dist
51 }
52
53 fn get_input(t: InpKind, data_folder: &mut PathBuf) -> Result<File, Error> {
54     for entry: Result<DirEntry, Error> in data_folder.read_dir() Result<ReadDir, Er...
55         .expect(msg: "Data folder couldn't be read!") {
56         if let Ok(f: DirEntry) = entry {
57             let file_name: OsString = f.path() PathBuf
58                 .file_name() Option<&OsStr>
59                 .expect(msg: "Data folder couldn't be opened!") &OsStr
60                 .to_owned();
61             // ...until you find the routes file!
62             match t {

```

```

61     match t {
62         InpKind::Dist => {
63             if file_name == OsStr::new("vasiko_diktyo_240520.kml") {
64                 return Ok(File::open(f.path())?);
65             }
66         },
67         InpKind::Route => {
68             if file_name == OsStr::new("routes.txt") {
69                 return Ok(File::open(f.path())?);
70             }
71         },
72         InpKind::Stops => {
73             if file_name == OsStr::new("stop_times.txt") {
74                 return Ok(File::open(f.path())?);
75             }
76         }
77     }
78 };
79
80
81     panic!("Unreachable statement reached.");
82 } fn get_input
83
84 pub fn parse_args() -> Result<Config, Error> {
85     // For reading configuration from input.
86     use std::io::stdin;
87     let mut line_name: Option<String> = None;
88     let mut electric: Option<bool> = None;
89     let route_data: Option<File>;
90     let stops_data: Option<File>;
91     let dist_data: Option<File>;

```

```

92
93     // Simple welcoming header.
94     println!("OASA Bus Operational Costs Calculator");
95     println!("-----");
96
97     println!("Please type the data folder location, or press ENTER (default: ./data:");
98     let mut buffer: String = String::new();
99     let mut data_folder: PathBuf = PathBuf::new();
100     stdin().read_line(buf: &mut buffer)?;
101     if !buffer.trim_end() &str
102         .is_empty() {
103         data_folder.push(path: &buffer);
104     } else {
105         data_folder.push(path: "./data");
106     }
107
108     println!("Please type the bus line you're interested in, or press ENTER (default: 230:");
109     let mut buffer: String = String::new();
110     stdin().read_line(buf: &mut buffer)?;
111     if !buffer.trim_end() &str
112         .is_empty() {
113         line_name = Some(String::from(buffer.trim_end()));
114     }
115
116     println!("Please type at least one character if you're interested in conventional (gas-powered) buses, or press ENTER (default: no:");
117     let mut buffer: String = String::new();
118     stdin().read_line(buf: &mut buffer)?;
119     if !buffer.trim_end() &str
120         .is_empty() {
121         electric = Some(false);
122     }

```

```

124     route_data = Some(get_input(t: InpKind::Route, &mut data_folder?));
125     stops_data = Some(get_input(t: InpKind::Stops, &mut data_folder?));
126     dist_data = Some(get_input(t: InpKind::Dist, &mut data_folder?));
127
128     Config::new(line_name,
129         route_data,
130         stops_data,
131         dist_data,
132         electric,)
133 } fn parse_args
134
135 pub fn parse_stop<'a>(inp: &'a str, targ: &'a str) -> bool {
136     let mut iter: Split<'_, char> = inp.split(',');
137     let trip_id: &str = iter.next().expect(msg: "Badly formatted stops file.");
138     let mut inner_iter: Split<'_, char> = trip_id.split('_');
139     let test_line: &str = inner_iter.next().expect(msg: "Badly formatted stops file.");
140
141     test_line == targ &&
142     inner_iter Split<'_, char>
143         .skip(1) impl Iterator<Item = &str>
144         .take(1) impl Iterator<Item = &str>
145         .next() Option<&str>
146         .expect(msg: "Badly formatted stops file.") == "1"
147 }
148
149 pub fn parse_line<'a>(inp: &'a str, targ: &'a str) -> Option<&'a str> {
150     let mut iter: Split<'_, char> = inp.split(',');
151     let cand_id: &str = iter.next().expect(msg: "Badly formatted source file.");
152     let cand_name: &str = iter.next().expect(msg: "Badly formatted source file.");

```

```

154     if cand_name == targ {
155         Some(cand_id)
156     } else { None }
157 }
158
159 pub fn plot_departures(data: &HashMap<u32, u16>, line: &str, is_dep: bool) {
160     use plotters::prelude::*;
161
162     let y_label: &str = if is_dep { "Departures" } else { "Buses in Traffic" };
163     let filename: &str = if is_dep { "deps.svg" } else { "buses.svg" };
164
165     let mut in_points: Vec<(u32, u16)> = data.iter().iter().u32, u16>
166         .map(|s: (&u32, &u16)| { (*s.0, *s.1) }
167         ) impl Iterator<Item = (u32, u16)>
168         .collect();
169
170     in_points.sort_unstable_by(compare: |a: &(u32, u16), b: &(u32, u16)| { a.0.cmp(&b.0) });
171     let mut running_deps: u16 = 0;
172     let mut out_points: Vec<(f32, f32)> = vec![];
173     let x_min: f32 = in_points[0].0 as f32;
174     let x_max: f32 = in_points.last().unwrap().0 as f32 + 1.0;
175     let mut y_max: u16 = 0;
176
177     for (hr: u32, deps: u16) in in_points {
178         if deps > y_max { y_max = deps; }
179         out_points.push((hr as f32, running_deps as f32));
180         out_points.push((hr as f32, deps as f32));
181         running_deps = deps;
182     }

```



```

183
184     out_points.push(x_max, running_deps as f32));
185     out_points.push(x_max, 0.0));
186
187     let drawing_area: DrawingArea<SVGBackend<'_, _>, _> = SVGBackend::new(path: filename, size: (1920, 1080)).into_drawing_area();
188     drawing_area.fill(color: &WHITE).unwrap();
189     let mut chart_builder: ChartBuilder<'_, '_, SVGBackend<'_, _>> = ChartBuilder::on(root: &drawing_area);
190     chart_builder.margin(size: 10).set_left_and_bottom_label_area_size(140);
191     let mut chart_context: ChartContext<'_, SVGBackend<'_, _>, _> = chart_builder.ChartB...
192         .caption(caption: format!("Line {} Profile (day_1)", u32::from_str_radix(line, 10).unwrap()), style: ("sans-serif", 40)) &mut ChartBuilder<'_, '_, SVG...
193         .build_cartesian_2d(x_spec: x_min as f32..(x_max + 1.0) as f32, y_spec: 0.0..(y_max + 1) as f32) Result<ChartContext<'_, SVGBa...
194         .unwrap();
195     chart_context.configure_mesh() MeshStyle<'_, '_, RangedCoordf32, _>, _>
196         .x_desc("Hour") &mut MeshStyle<'_, '_, RangedCoordf32, _>, _>
197         .y_desc(y_label) &mut MeshStyle<'_, '_, RangedCoordf32, _>, _>
198         .draw().unwrap();
199     chart_context.draw_series(Lineseries::new(out_points.into_iter(), style: BLACK) Lineseries<SVGBackend<'_, _>, _>
200         .point_size(3)).unwrap();
201 } fn plot_departures

```

```

1 use chrono::{prelude::*, Duration};
2
3 // How many days per year is the line functional.
4 pub const N: f32 = 313.0;
5 // Hourly driver wage.
6 pub const DRIVER_SALARY: f32 = 11.13;
7 pub const EV_MEAN_ENERGY: f32 = 0.00074;
8 /*
9 // Energy consumption per meter (kWh/m)
10 // Energy price.
11 pub const ENERGY_PRICE: f32 = 0.081;
12 */
13 pub const UTIL_FACTOR: f32 = 0.9;
14 pub const BATTERY_CAPACITY: f32 = 350.0;
15
16 #[derive(Debug, Clone, Copy)]
17 4 implementations
18 pub struct Passage {
19     // Represents a moving bus, passing
20     // through a stop. This could be the
21     // start, the end, or the midst of the
22     // route.
23     bus_no: u16,
24     time: NaiveTime,
25     stop: u32,
26     p_id: u16
27 }
28 impl Passage {
29     pub fn get_no(&self) -> u16 {
30         self.bus_no
31     }
32 }

```

```

33 pub fn pull_to_here(&self) -> Self {
34     Self {
35         bus_no: self.get_no(),
36         time: self.time.overflowing_sub_signed(Duration::minutes(30)).0,
37         stop: 0,
38         p_id: 0
39     }
40 }
41
42 pub fn pull_from_here(&self) -> Self {
43     Self {
44         bus_no: self.get_no(),
45         time: self.time.overflowing_add_signed(Duration::minutes(30)).0,
46         stop: 0,
47         p_id: self.p_id + 1
48     }
49 }
50
51 pub fn get_hour(&self) -> u32 {
52     self.time.hour()
53 }
54
55 pub fn is_departure(&self) -> bool {
56     self.p_id == 1
57 }
58
59 pub fn is_pullop(&self) -> bool {
60     self.stop == 0
61 }
62

```

```

63 pub fn new(txt: &str) -> Self {
64     // Parses a line from the input file and creates
65     // the corresponding Passage.
66     let mut iter: Split<'_, char> = txt.split(',');
67     let trip_id: &str = iter.next().expect(msg: "Badly formatted stops file.");
68     let inner_iter: Split<'_, char> = trip_id.split('_');
69
70     let bus_no: u16 = inner_iter.skip(3) impl Iterator<Item = &str>
71         .take(1) impl Iterator<Item = &str>
72         .map(|s: &str| {
73             u16::from_str_radix(src: s, radix: 10) Result<u16, ParseIntError>
74                 .expect(msg: "Error parsing bus_no.")}) impl Iterator<Item = u16>
75         .next() Option<u16>
76         .expect(msg: "Error collecting bus no.");
77
78     let time_str: &str = iter.next().expect(msg: "Bad format");
79     let time: NaiveTime = match NaiveTime::parse_from_str(s: time_str, fmt: "%T") {
80         Ok(t: NaiveTime) => { t },
81         Err(_) => {
82             let mut els: Split<'_, char> = time_str.split(':');
83             let hr: u32 = u32::from_str_radix(src: els.next().expect(msg: "Bad hr"), radix: 10).expect(msg: "la");
84             let mins: u32 = u32::from_str_radix(src: els.next().expect(msg: "Bad mins"), radix: 10).expect(msg: "la");
85             let secs: u32 = u32::from_str_radix(src: els.next().expect(msg: "Bad mins"), radix: 10).expect(msg: "la");
86
87             NaiveTime::from_hms_opt(hour: hr - 24, min: mins, sec: secs) Option<NaiveTime>
88                 .expect(msg: "sfd")
89         },
90     };
91
92     let stop: u32 = u32::from_str_radix(
93         src: iter Split<'_, char>

```

```

94         .clone() Split<'_, char>
95         .skip(1) impl Iterator<Item = &str>
96         .next() Option<&str>
97         .expect(msg: "Error parsing stop id"),
98         radix: 10) Result<u32, ParseIntError>
99         .expect(msg: "dfs");
100
101     let p_id: u16 = u16::from_str_radix(
102         src: iter.skip(2) impl Iterator<Item = &str>
103         .next() Option<&str>
104         .expect(msg: "Error parsing stop id"),
105         radix: 10) Result<u16, ParseIntError>
106         .expect(msg: "asghf");
107
108     Self {bus_no, time, stop, p_id}
109 } fn new
110
111 pub fn temporal_diff(&self, prev: &Self) -> Option<Duration> {
112     let curr_time: NaiveTime = self.time;
113     let prev_time: NaiveTime = prev.time;
114
115     let mut res: TimeDelta = curr_time.signed_duration_since(prev_time);
116
117     if res.num_seconds() < 0 {
118         res = res.checked_add(&Duration::seconds(86400)).unwrap();
119     } else if res.num_minutes() > 60 {
120         // Fake layover identification.
121         return None;
122     }

```

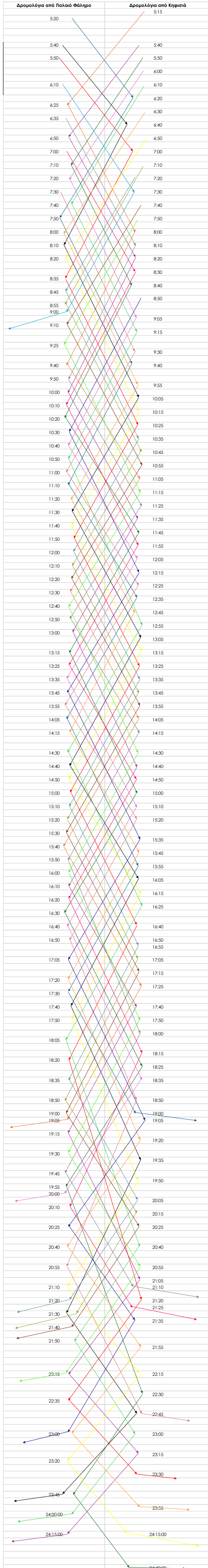
```

122     }
123
124     Some(res)
125 }
126 } impl Passage
127
128 pub fn compute_yearly_driver_cost(rough: (NaiveTime, i64)) -> f32 {
129     let mut res: f32 = 0.0;
130     let days: f32 = (rough.1 / 86400) as f32;
131     res += days * 24.0;
132     let hours: f32 = rough.0.hour() as f32;
133     res += hours;
134     res += rough.0.minute() as f32 / 60.0;
135
136     res / UTIL_FACTOR * N * DRIVER_SALARY
137 }
138
139 pub fn compute_yearly_energy_cost(tot_dist: f64, is_electric: bool) -> f32 {
140     let (mean_energy: f32, energy_price: f32) = if is_electric {
141         // kWh / m, euros/kWh
142         (EV_MEAN_ENERGY, 0.081)
143     } else {
144         // lt / m, euros/lt
145         (33.2 / 100_000.0, 1.07)
146     };
147     let res: f32 = tot_dist as f32 * mean_energy * N * energy_price;
148
149     res
150 }

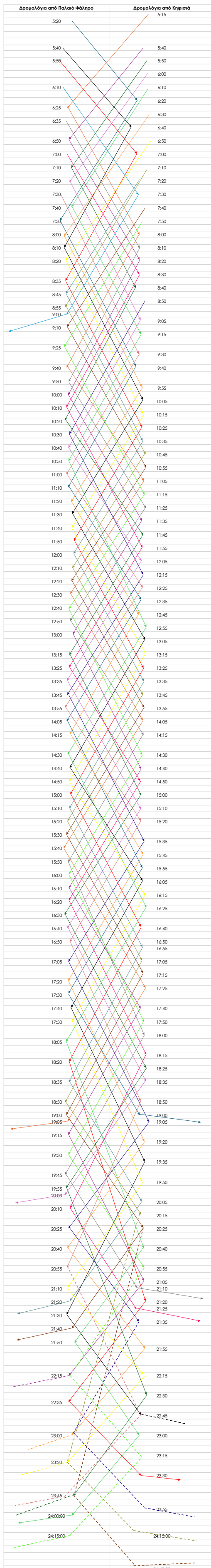
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΓΡΑΦΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

550 Π. ΦΑΛΗΡΟ – ΚΗΦΙΣΙΑ (ΠΡΙΝ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ)



550 Π. ΦΑΛΗΡΟ – ΚΗΦΙΣΙΑ (ΜΕΤΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ)



220 ΑΝΩ ΙΛΙΣΙΑ – ΑΚΑΔΗΜΙΑ (ΚΥΚΛΙΚΗ)

