



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

Διπλωματική εργασία

**Καταμερισμός Λεωφορείων σε Αμαξοστάσια: Ανάπτυξη
Μοντέλου Βελτιστοποίησης Μεικτού Ακέραιου Γραμμικού
Προγραμματισμού**

ΚΑΡΙΜΑΛΗ ΕΡΩΦΙΛΗ

Επίβλεψη:

Κωνσταντίνος Κεπαπτσόγλου, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβρης 2022

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με τη παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Με αφορμή αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν για την επίτευξη του στόχου αυτού.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Κ. Κεπαπτσόγλου, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών για την ανάθεση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Η πραγματοποίηση της διπλωματικής εργασίας αυτής δε θα είχε υλοποιηθεί χωρίς τη πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη βοήθεια και τη στήριξή του σε όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου, χωρίς τους οποίους τίποτα από όσα έχω πετύχει μέχρι σήμερα δε θα ήταν πραγματικότητα.

Καρίμαλη Ερωφίλη

ΣΥΝΟΨΗ

Τίτλος: **Καταμερισμός Λεωφορείων σε Αμαξοστάσια: Ανάπτυξη Μοντέλου Βελτιστοποίησης Μεικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού.**

Όνομα: Καρίμαλη Ερωφίλη

Επιβλέπων: Κεπαπτσόγλου Κωνσταντίνος

Αθήνα, Οκτώβρης 2022

Στη παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρείται βελτιστοποίηση του καταμερισμού στόλου λεωφορείων σε αμαξοστάσια της Αττικής, λαμβάνοντας υπόψη ότι κάποια από αυτά είναι ηλεκτροκίνητα. Για το σκόπο αυτό αναπτύσσεται μοντέλο βελτιστοποίησης μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού, το οποίο επιλύεται με τη βοήθεια του λογισμικού Excel Open Solver. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν συλλέχθηκαν από τον Οργανισμό Αστικών Συγκοινωνιών Αθήνας (Ο.Α.Σ.Α.) και αφορούν στις λεωφορειακές γραμμές της Αττικής. Έχουν συμπεριληφθεί νέα ηλεκτρικά λεωφορεία που σκοπεύει ο φορέας να αγοράσει στο μέλλον για εξοικονόμηση ενέργειας. Η αντικειμενική συνάρτηση που δημιουργήθηκε ελαχιστοποιεί το κόστος «νεκρών» χιλιομέτρων που διανύουν τα λεωφορεία στην αρχή και στο τέλος της βάρδιάς τους. Διαμορφώθηκαν εναλλακτικά σενάρια με στόχο την εξαγωγή αποτελεσμάτων σχετικά με το κόστος καταμερισμού αλλά και τα ποσοστά πληρότητας των αμαξοστασίων. Επίσης πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας για τις τιμές καυσίμων κατανάλωσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το προτεινόμενο μοντέλο συμβάλει στη βέλτιστη κατανομή των λεωφορείων στα αμαξοστάσια και στην εξισορρόπηση της πληρότητας των αμαξοστασίων. Τα αμαξοστάσια με μικρή χωρητικότητα παρουσιάζουν μεγάλα ποσοστά πληρότητας και άρα υπάρχουν δυσκολίες στο συντονισμό και τη λειτουργία τους. Τέλος τα αμαξοστάσια με μεγάλη χωρητικότητα παρουσιάζουν μικρότερα ποσοστά πληρότητας.

Λέξεις – Κλειδιά: μεικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός, κατανομή λεωφορείων σε αμαξοστάσια, κόστος καταμερισμού, ποσοστό πληρότητας αμαξοστασίου

ABSTRACT

Title: Allocation of Buses to Depots: Development of an Optimization Model Mixed Integer Linear Programming

Name: Karimali Erofilis

Supervisor: Konstantinos Kepaptsoglou

Athens, October 2022

This diploma thesis focuses on the optimal allocation of buses to depots in Attica, Greece, considering electric vehicles. A mixed integer linear programming optimization model is developed and solved using Excel Open Solver software. The data used were collected by Athens Public Transport Organization (O.A.S.A.) and concern the bus lines of Attica. New electric buses that the operator intends to purchase in the future to save energy have been included. The objective function created minimizes the cost of deadhead kilometers traveled by buses at the beginning and end of their shift. Alternative scenarios were formulated with the aim of extracting results regarding the allocation of costs and the occupancy rates of the bus depots. A sensitivity analysis was also carried out for fuel prices. The results show that the proposed model contributes to the optimal allocation of buses to bus depots and to the balancing of the depots occupancy. Depots with small capacity show high occupancy rates and therefore there are difficulties in their coordination and operation. Finally, depot stations with large capacity show lower occupancy rates.

Key – Words: mixed integer linear programming, allocation cost of buses, occupancy rates

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	3
ΣΥΝΟΨΗ	4
ABSTRACT	5
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1 Γενικά.....	8
1.2 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας.....	9
1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας.....	9
2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	11
2.1 Εισαγωγή	11
2.2 Ηλεκτρικά λεωφορεία	11
2.2.1 Ηλεκτρικά λεωφορεία με μπαταρία	13
2.2.2 Υβριδικά ηλεκτρικά λεωφορεία	13
2.2.3 Τρόποι φόρτισης και μπαταρία.....	14
2.3 Έρευνες για τον καταμερισμό στόλου λεωφορείων σε αμαξοστάσια	16
2.4 Σύνοψη	36
3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	38
3.1 Γενικά.....	38
3.2 Γενική περιγραφή προβλήματος.....	38
3.3 Δεδομένα.....	39
3.3.1 Τύποι και είδη λεωφορείων.....	39
3.3.2 Λεωφορειακές γραμμές	40
3.3.3 Συγκροτήματα και υπογραμμές	40
3.3.4 Αμαξοστάσια	40
3.3.5 Αποστάσεις-«Νεκρά» χιλιόμετρα	41
3.4 Περιορισμοί.....	42
3.5 Αναλυτική περιγραφή προβλήματος	42
3.5.1 Περιγραφή εννοιών.....	42
3.5.2 Περιγραφή μαθηματικού προτύπου.....	45
3.6 Συμπεράσματα	47
4 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ	48
4.1 Εισαγωγή	48
4.2 Συλλογή στοιχείων	48
4.3 Μεθοδολογία επίλυσης μαθηματικού μοντέλου με χρήση Excel- Open Solver	53

5 ΣΕΝΑΡΙΑ	58
5.1 Εισαγωγή	58
5.2 Παρουσίαση σεναρίων.....	58
5.3 Αποτελέσματα επίλυσης εναλλακτικών σεναρίων	61
5.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	63
5.5 Ανάλυση ευαισθησίας.....	64
5.5.1 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας	64
5.5.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων ανάλυσης ευαισθησίας	68
6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ	69
6.1 Συμπεράσματα	69
6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	70
7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	72

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η ραγδαία αύξηση των ιδιωτικών οχημάτων τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα έχει δημιουργήσει δυσχερείς συνθήκες στα αστικά οδικά δίκτυα. Το πρόβλημα αυτό φαίνεται να είναι πιο έντονο στην Αττική και πιο συγκεκριμένα στην περιοχή της Αθήνας. Λόγω αυτών των συνθηκών η ανάγκη για ενίσχυση των αστικών συγκοινωνιών είναι πιο επιτακτική από ποτέ. Οι αστικές συγκοινωνίες αποτελούν κοινωνικό αγαθό, παρέχοντας ίσες ευκαιρίες ποιοτικής και ασφαλούς μετακίνησης προς όλους τους πολίτες. Παρόλο που η χρήση τους σταδιακά αυξάνεται, ιδιαίτερα από άτομα που δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν ιδιωτικά μέσα, οι φορείς διαχείρισης συχνά δυσκολεύονται να λειτουργήσουν σωστά λόγω μειωμένων εσόδων και του αυξημένου κόστους λειτουργίας τους.

Οι αστικές συγκοινωνίες συμβάλουν σημαντικά στη βιώσιμη ανάπτυξη των πόλεων, συντελώντας στη προστασία του περιβάλλοντος μέσω της μείωσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και της εξοικονόμησης καυσίμων. Καθώς οι αστικές συγκοινωνίες συνεισφέρουν στην οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη των πόλεων, η βελτίωση της λειτουργίας και των υπηρεσιών που προσφέρουν αποτελεί κύρια προτεραιότητα.

Σε αυτό το πλαίσιο η βέλτιστη κατανομή των λεωφορείων σε αμαξοστάσια, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των δαπανών του φορέα. Κρίνεται αναγκαία η μείωση των «νεκρών», μη παραγωγικών χιλιομέτρων που διανύει κάθε λεωφορείο από το αμαξοστάσιο έως την αφετηρία της γραμμής που ανήκει και από το τέρμα της γραμμής μέχρι το αμαξοστάσιο. Καθώς η διαδρομή αυτή δεν εξυπηρετεί το επιβατικό κοινό προκαλείται επιπλέον κατανάλωση καυσίμων, φθορά ελαστικών και ρύπανση του περιβάλλοντος, χωρίς να παράγεται μεταφορικό έργο.

1.2 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βέλτιστη κατανομή των λεωφορείων του Οργανισμού Αστικών Συγκοινωνιών Αθήνας στα ήδη υπάρχοντα αμαξοστάσια, συμπεριλαμβανομένων και των νέων ηλεκτρικών λεωφορείων, τα οποία πρόκειται να προμηθευτεί ο Οργανισμός στο άμεσο μέλλον. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση προτύπου μεικτού αέριου γραμμικού προγραμματισμού, το οποίο θα εστιάσει στη μείωση του κόστους των μη παραγωγικών «νεκρών» χιλιομέτρων και του κόστους ισοκατανομής τους. Τέσσερα διαφορετικά σενάρια διαμορφώνονται προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα ως προς τη μείωση του κόστους και τη βέλτιστη κατανομή των λεωφορείων στα αμαξοστάσια. Όλα τα στοιχεία που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη διπλωματική εργασία έχουν συλλεχθεί από τον Οργανισμό Αστικών Συγκοινωνιών Αθήνας και από τον Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η δομή της διπλωματικής εργασία παρουσιάζεται αναλυτικά στα κεφάλαια που ακολουθούν. Πιο συγκεκριμένα:

Στο **2^ο κεφάλαιο** πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση όλων των ερευνών που έχουν γίνει σε διεθνές επίπεδο σχετικά με τον καταμερισμό των λεωφορείων σε αμαξοστάσια. Παρατίθενται εργασίες από την Ελλάδα και το εξωτερικό, οι οποίες έχουν δημοσιευτεί σε συνέδρια, επιστημονικά περιοδικά, άρθρα ή συγγράμματα. Πραγματοποιείται σύνοψη της κάθε εργασίας που περιλαμβάνει το πλαίσιο της έρευνας, τη μεθοδολογία και τα βασικά αποτελέσματα, με έμφαση στα στοιχεία που παρουσιάζουν συνάφεια με το αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας. Παράλληλα γίνεται παρουσίαση των χαρακτηριστικών των ηλεκτρικών λεωφορείων, που έχουν συμπεριληφθεί στην διπλωματική εργασία.

Στο **3^ο κεφάλαιο** αναφέρεται όλο το θεωρητικό υπόβαθρο του μαθηματικού προτύπου που χρησιμοποιήθηκε και στοχεύει στο βέλτιστο καταμερισμό του στόλου λεωφορείων. Πιο συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στο γραμμικό προγραμματισμό και στη χρήση του μέσω εργαλείων ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Στο **4^ο κεφάλαιο** γίνεται η παρουσίαση του προβλήματος που ασχολείται η διπλωματική εργασία και η ανάλυση του μαθηματικού μοντέλου που αναπτύχθηκε.

Στο **5^ο κεφάλαιο** παρουσιάζονται οι διαδικασίες συλλογής στοιχείων και η αναλυτική περιγραφή της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε έως την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Δίνεται επίσης έμφαση στον τρόπο εισαγωγής των στοιχείων στο λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε και εφαρμόζονται τα τέσσερα σενάρια που έγιναν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Στο **6^ο κεφάλαιο** αναπτύσσονται τα εναλλακτικά σενάρια που έγιναν στη παρούσα διπλωματική εργασία καθώς και τα αποτελέσματά τους. Επίσης γίνεται ανάλυση ευαισθησίας της τιμής των καυσίμων των λεωφορείων προκειμένου να φανεί η μεταβολή στο συνολικό κόστος.

Στο **7^ο κεφάλαιο** περιλαμβάνονται τα σημαντικότερα συμπεράσματα που διεξάχθηκαν από την εφαρμογή της μεθοδολογίας. Ακόμα καταγράφονται και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα σχετική με το αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Στο **8^ο κεφάλαιο**, που είναι και το τελευταίο της παρούσα διπλωματικής εργασίας παρατίθεται όλη η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή της διπλωματικής εργασίας.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ανασκόπηση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων από έρευνες συναφείς με το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας καθώς και μεθοδολογιών συναφών με τη μεθοδολογία της διπλωματικής εργασίας. Και στις δύο περιπτώσεις εξετάζονται εργασίες από την Ελλάδα και το εξωτερικό και παρατίθεται σύνοψη της κάθε εξεταζόμενης εργασίας που περιλαμβάνει το πλαίσιο της έρευνας, τη μεθοδολογία και τα βασικά αποτελέσματα.

Ο στόχος της ανασκόπησης των μεθοδολογιών είναι να προσδιοριστούν οι μεθοδολογίες από τις οποίες θα επιλεγεί η καταλληλότερη για την αντιμετώπιση του αντικειμένου της διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον, η ανασκόπηση των συναφών μεθοδολογιών επιτρέπει την αναλυτική εξέταση των χαρακτηριστικών της μεθοδολογίας που επιλέχτηκε, διευκολύνοντας την εφαρμογή της.

2.2 Ηλεκτρικά λεωφορεία

Τα ηλεκτρικά λεωφορεία πρωτοεμφανίστηκαν ως τρόλεϊ από τη Siemens το 1882. Από τότε, τα τρόλεϊ έχουν γίνει μέρος του συστήματος δημόσιας συγκοινωνίας σε πολλές πόλεις. Σήμερα υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για τα ηλεκτρικά λεωφορεία καθώς επιτρέπουν οικονομικότερη και πιο ευέλικτη ανάπτυξη των αστικών συγκοινωνιών. Τα ηλεκτρικά λεωφορεία διαφέρουν επίσης ως προς το μέγεθος της μπαταρίας και την τεχνική του κινητήρα. (C. Häll et al., 2018)

Οι δύο κύριοι τύποι ηλεκτρικών λεωφορείων, που εξετάζονται και δοκιμάζονται σήμερα στα συστήματα δημόσιας συγκοινωνίας, είναι τα ηλεκτρικά λεωφορεία με μπαταρία (battery electric buses) και τα υβριδικά ηλεκτρικά λεωφορεία plug-in (hybrid electric buses). (C. Häll et al., 2018)



Εικόνα 2.1: Ηλεκτρικό λεωφορείο με μπαταρία
Πηγή: <https://www.sustainable-bus.com/>



Εικόνα 2.2: Υβριδικό λεωφορείο
Πηγή: <https://www.sustainable-bus.com/>

2.2.1 Ηλεκτρικά λεωφορεία με μπαταρία

Τα ηλεκτρικά λεωφορεία με μπαταρία βασίζονται αποκλειστικά σε μια ενσωματωμένη μπαταρία για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στον κινητήρα. Έτσι, το εύρος λειτουργίας εξαρτάται από το μέγεθος της μπαταρίας, σε kWh. Το μέγεθος της μπαταρίας που απαιτείται για τη λειτουργία του λεωφορείου σε ένα σύστημα δημόσιας συγκοινωνίας εξαρτάται επίσης από τη διαθέσιμη υποδομή φόρτισης. Τα ηλεκτρικά λεωφορεία με μπαταρία έχουν το πλεονέκτημα ότι έχουν μηδενικές εκπομπές καυσαερίων, αλλά από την άλλη βασίζονται σε μια αρκετά μεγάλη μπαταρία. Έτσι, ανάλογα με το μέγεθος της μπαταρίας, διατίθενται ηλεκτρικά λεωφορεία μπαταρίας με διαφορετικές μέγιστες εμβέλεις. (C. Häll et al., 2018)

2.2.2 Υβριδικά ηλεκτρικά λεωφορεία

Τα υβριδικά ηλεκτρικά λεωφορεία συνδυάζουν έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης με έναν ηλεκτροκινητήρα. Αυτό μπορεί να γίνει είτε παράλληλα είτε σε σειρά. Σε μια παράλληλη εγκατάσταση και οι δύο τύποι κινητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πρόωση. Αντίθετα, η διάταξη της σειράς περιλαμβάνει έναν ηλεκτροκινητήρα, που χρησιμοποιείται για πρόωση, και έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης ως γεννήτρια, που χρησιμοποιείται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στον ηλεκτροκινητήρα όταν δεν λειτουργεί με ηλεκτρισμό από μπαταρία. Οι δύο προσεγγίσεις μπορούν να συνδυαστούν σε ένα σειριακό-παράλληλο set-up, το οποίο μπορεί να επωφεληθεί τόσο από σειρές όσο και από παράλληλες ρυθμίσεις. Οι υβριδικοί κινητήρες υπόκεινται σε έλεγχο του συστήματος μετάδοσης κίνησης, ο οποίος με βάση κάποια στρατηγική διαχείρισης ενέργειας καθορίζει πότε και πώς λειτουργούν οι δύο διαφορετικοί κινητήρες. Ο σχεδιασμός ελέγχου του συστήματος μετάδοσης κίνησης έχει μεγάλο αντίκτυπο στην απόδοση του κινητήρα, τη χρήση ενέργειας και τις εκπομπές ρύπων. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται τέσσερις κύριοι στόχοι με τον έλεγχο του συστήματος μετάδοσης κίνησης: μέγιστη οικονομία καυσίμου, ελάχιστες εκπομπές ρύπων, ελάχιστο κόστος συστήματος και καλές επιδόσεις οδήγησης. Για υβριδικά λεωφορεία με δυνατότητα λειτουργίας μόνο με ηλεκτρικό κινητήρα, ο οδηγός μπορεί να θέλει να περιορίσει πότε και πού μπορεί το λεωφορείο να χρησιμοποιεί τον κινητήρα εσωτερικής καύσης. Δημιουργώντας έτσι περιοχές μηδενικών εκπομπών και θορύβου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με γεωγραφική περίφραξη, αλλά θα πρέπει να σημειωθεί ότι εάν μια τέτοια στρατηγική διαχείρισης παρακάμπτει τις στρατηγικές ελέγχου του συστήματος μετάδοσης κίνησης του κατασκευαστή, η απόδοση του κινητήρα, όσον αφορά τη χρήση ενέργειας και τις εκπομπές, ενδέχεται να μην είναι η υποσχόμενη. Αυτό θα μπορούσε, για παράδειγμα, να συμβεί εάν ο κινητήρας εσωτερικής καύσης λειτουργεί μόνο για μικρά διαστήματα, χωρίς να φθάνει ποτέ τη βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας. Αυτή η σύγκρουση συμφερόντων είναι εμφανής, αλλά δεν εξετάζεται καλά στη βιβλιογραφία, η οποία επικεντρώνεται κυρίως στη διαχείριση του συστήματος μετάδοσης κίνησης από την άποψη του κατασκευαστή. (C. Häll et al., 2018)

2.2.3 Τρόποι φόρτισης και μπαταρία

Ανεξάρτητα από το εάν τα εξεταζόμενα λεωφορεία είναι ηλεκτρικά ή υβριδικά λεωφορεία, υπάρχει ανάγκη φόρτισης στα αμαξοστάσια στάθμευσης καθώς και σε ενδιάμεσες στάσεις φόρτισης. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες:

- **Γρήγορη φόρτιση:** Αυτή η κατηγορία αποτελείται από οποιαδήποτε τεχνολογία επιτρέπει την επαναφόρτιση μέσα σε λίγα λεπτά, τόσο στα τελικά σημεία όσο και στις στάσεις λεωφορείων, και την αλλαγή μπαταρίας. Το μέγεθος της μπαταρίας πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε το λεωφορείο να παραλείπει περιστασιακά ένα τελικό σημείο φόρτισης εάν υπάρχουν καθυστερήσεις. Εάν το λεωφορείο φύγει από το αμαξοστάσιο με μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία, μπορεί να επιστρέψει με χαμηλή μπαταρία το βράδυ, επομένως η δυνατότητα φόρτισης μπορεί να προγραμματιστεί έτσι ώστε να μην τροφοδοτούνται πλήρως οι μπαταρίες κατά τη διάρκεια της ημέρας.
- **Φόρτιση κατά τη διάρκεια της νύχτας:** Πρόκειται για οποιαδήποτε τεχνολογία απαιτεί χρόνους φόρτισης 30 λεπτών ή περισσότερο (έως και αρκετές ώρες). Υποθέτουμε ότι μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία θα επιτρέψει στο λεωφορείο να λειτουργήσει για μια ολόκληρη μέρα (φόρτιση σε αμαξοστάσια).
- **Συνεχής φόρτιση:** Αυτή η κατηγορία καλύπτει όλες τις τεχνολογίες που απαιτούν συνεχή φόρτιση, όπως εναέριες γραμμές ή επαγωγική μεταφορά ενέργειας κάτω από το ασφάλτο (φόρτιση κατά την οδήγηση).

Μια μεγάλη μπαταρία έχει μεγαλύτερο βάρος και καταλαμβάνει περισσότερο χώρο, επομένως θα αυξήσει την ισχύ που απαιτείται για την προώθηση του λεωφορείου και θα μειώσει τον μέγιστο αριθμό επιβατών στο λεωφορείο. Αντίθετα, μια μικρότερη μπαταρία θα μειώσει την απαιτούμενη ισχύ και θα αυξήσει τον αριθμό των επιβατών, αλλά από την άλλη θα μειώσει την αυτονομία. Έτσι, η επιλογή του λεωφορείου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον σχεδιασμό των λεωφορειακών γραμμών και την υποδομή φόρτισης, μια εξάρτηση που έχει μικρότερη σημασία για τα συμβατικά λεωφορεία.

Για τους διαφορετικούς τύπους των λεωφορείων προκύπτουν από τη βιβλιογραφία οι εξής χωρητικότητες:

- 60, 90, 120 kWh για το τυπικό λεωφορείο δώδεκα μέτρων (12 m - SB)
- 90, 120, 150 kWh για το αρθρωτό λεωφορείο δεκαοκτώ μέτρων (18 m - AB) και όμοια για το διώροφο λεωφορείο (DD).

Η κατανάλωση ενέργειας ενός ηλεκτρικού λεωφορείου, εξαρτάται από το βάρος του φορτίου, τις καιρικές συνθήκες και την διαδρομή. Επειδή η κατανάλωση ενέργειας στα ηλεκτρικά λεωφορεία είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τα πετρελαιοκίνητα, η διακύμανσή της μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα στο κόστος του κύκλου ζωής των ηλεκτρικών λεωφορείων. Όταν λειτουργεί σε συνθήκες κρύου η κατανάλωση της ενέργειας μπορεί να αυξηθεί λόγω της χρήσης θέρμανσης, ειδικά αν η ενέργεια απορροφάται από την μπαταρία. Ωστόσο, έρευνες έχουν δείξει ότι οι καιρικές συνθήκες μπορούν να αντιμετωπιστούν με σωστό συνδυασμό φόρτισης ισχύος, διαστασιολόγηση μπαταρίας και περιστασιακή φόρτιση. (Lajunen, 2017)

Το κόστος αγοράς των ηλεκτρικών λεωφορείων με μπαταρία μπορεί να ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με την ενεργειακή χωρητικότητα της μπαταρίας και τη χημεία της μπαταρίας. Οι επί του παρόντος διαθέσιμες και δοκιμασμένες τεχνολογίες φόρτισης επιτρέπουν αγωγή γρήγορη φόρτιση έως 500 kW και επαγωγική φόρτιση έως 200 kW χρησιμοποιώντας μια μπαταρία ως εσωτερική αποθήκευση (Kunith,2017)

Οι παράμετροι κόστους καθορίστηκαν με βάση τις τιμές που παρουσιάζονται στην πρόσφατη βιβλιογραφία. Ο Πίνακας που ακολουθεί δείχνει τις επιλεγμένες παραμέτρους κόστους για αυτήν την αξιολόγηση. Το κόστος αγοράς των ηλεκτρικών λεωφορείων με μπαταρία μπορεί να ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με την ενεργειακή χωρητικότητα και την κατασκευή της μπαταρίας. (Lajunen,2017)

Πίνακας 2.1: Προκαθορισμένοι παράμετροι κόστους. (Lajunen 2017)

Parameter description	Value
Purchase cost of electric bus (without battery) (€)	350000
Purchase cost of diesel bus (€)	225000
High-energy battery cost (€/kWh)	500
High-power battery cost (€/kWh)	800
Maintenance cost (€/km)	0.20
Fast charging device cost (P>200 kW) (€)	250000
Overnight charging device cost (P<=50kW) (€)	20000
Yearly charging device maintenance (%)	3

Electricity cost (€/kWh)	0.10
Electricity demand charges (€/kWh)	10.00
Reference service life of buses (years)	12
Discount rate (%)	3
Yearly operation (h)	4000
Service life of charging devices (years)	20

2.3 Έρευνες για τον καταμερισμό στόλου λεωφορείων σε αμαξοστάσια

Στη πρόσφατη έρευνα των Chavhan κ.α. (2020) προτείνεται ένα νέο δυναμικό σχήμα κατανομής οχημάτων δημόσιας μεταφοράς που βασίζεται στην τεχνική Emergent Intelligence (EI) σε μια μητροπολιτική περιοχή. Τα συστήματα δημόσιων μεταφορών σε μια μητροπολιτική περιοχή αντιμετωπίζουν πολλά σύνθετα ζητήματα, όπως κατανομή πόρων, συμφόρηση, αξιοπιστία πόρων κ.α.. Η πρόοδος αυτών των θεμάτων μπορεί να οδηγήσει σε οικονομικές απώλειες, λιγότερη χρήση των πόρων μεταφοράς και καθυστέρηση στα μετακινούμενα οχήματα. Η τεχνική EI διατηρεί ιστορικές πληροφορίες, τα ποσοστά άφιξης των επιβατών, τη διαθεσιμότητα πόρων, τους πόρους ελλείμματος και τους πλεονάζοντες πόρους των γειτονικών αμαξοστασίων. Στο σχήμα που προτείνεται, η τεχνική EI χρησιμοποιείται για τη συλλογή, ανάλυση, κοινή χρήση και βέλτιστη κατανομή των πόρων μεταφοράς αποτελεσματικά. Η προτεινόμενη τεχνική EI παρέχει αξιόπιστες υπηρεσίες (κατανομή και προγραμματισμό) και αναπτύσσεται σε διαφορετική ώρα της ημέρας στη μητροπολιτική περιοχή. Στην έρευνα αυτή έχουν δημιουργηθεί μαθηματικά μοντέλα για την εκτίμηση των πόρων, τη χρήση και τις παραμέτρους αξιοπιστίας. Το προτεινόμενο σχήμα ελέγχεται εξαντλητικά με προσομοίωση και αναλύεται με ποικίλους ρυθμούς άφιξης επιβατών, αριθμό οχημάτων, αριθμό αιτημάτων και διαφορετικές τιμές παραμέτρων αξιοπιστίας. Τα αποτελέσματα του προτεινόμενου σχήματος (αναλυτικά, προσομοίωση και σύγκριση) δείχνουν την αξιοπιστία, την ακρίβεια και την ικανότητα ανάπτυξης σε πραγματικό χρόνο. Ο μέσος χρόνος αναμονής του προτεινόμενου συστήματος DVA είναι βελτιωμένος (3,37 λεπτά) σε σύγκριση με το σχήμα κατανομής οχημάτων σταθερής περιόδου (4,89 λεπτά) και βελτιώθηκε η αξιοπιστία προγραμματισμού (68%) σε σύγκριση με το STN (58%). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν υποδηλώνουν την αποτελεσματικότητα, την ακρίβεια, την ανάπτυξη σε πραγματικό χρόνο και τις αξιόπιστες υπηρεσίες του προτεινόμενου νέου συστήματος στους μεταφορείς και τους φορείς εκμετάλλευσης συγκοινωνιών σε μια μητροπολιτική περιοχή.

Σε μία επίσης πρόσφατη έρευνα των Shuimiao κ.α. (2019) προτείνεται ένα ακέραιο μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού που βελτιστοποιεί την κατανομή των λεωφορείων σε αμαξοστάσια, λαμβάνοντας υπόψη τα «νεκρά» χιλιόμετρα μεταξύ των σταθμών λεωφορείων και των αμαξοστασίων, τον περιορισμό της χωρητικότητας στάθμευσης, της χωρητικότητας φόρτισης και της χωρητικότητας συντήρησης στα αμαξοστάσια. Στο μοντέλο λαμβάνεται υπόψη η ζήτηση των αμιγώς ηλεκτρικών λεωφορείων και των συνηθισμένων λεωφορείων. Τα δεδομένα που αναλύθηκαν ήταν από τη πόλη Σιάν της Κίνας και τα αποτελέσματα του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν για να προσδιοριστεί ο βέλτιστος αριθμός, η τοποθεσία και η προτεραιότητα κατασκευής των αμαξοστασίων και η κατανομή των λεωφορείων σε αυτά. Τα αμαξοστάσια των λεωφορείων είναι μια απαραίτητη υποδομή ενός συστήματος διαμετακόμισης. Η επιλογή της θέσης των αμαξοστασίων έχει σημαντική επίδραση στο λειτουργικό κόστος.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το μοντέλο βελτιστοποίησης μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά τα «νεκρά» χιλιόμετρα βελτιστοποιώντας την κατανομή λεωφορείων σε αμαξοστάσια και μπορεί να βοηθήσει στον προσδιορισμό της προτεραιότητας κατασκευής των αμαξοστασίων. Το κόστος των νεκρών χιλιομέτρων στις δημόσιες συγκοινωνίες μπορεί να μειωθεί με τον εύλογο σχεδιασμό της θέσης των αμαξοστασίων και την αντιστοίχιση της ζήτησης λεωφορείων με αμαξοστάσια. Αναφέρεται ότι τα «νεκρά» χιλιόμετρα του λεωφορείου αποτελούνται από τρία μέρη: την απόσταση από τον τερματικό σταθμό των λεωφορείων έως τον σταθμό αποστολής, την απόσταση από τον τερματικό σταθμό των λεωφορείων μέχρι το χώρο στάθμευσης και την απόσταση από τα αμαξοστάσια έως τον κοντινό σταθμό συντήρησης.

Αυτή η μελέτη στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των συνολικών «νεκρών» χιλιομέτρων, που περιλαμβάνουν την απόσταση από τον τερματικό σταθμό των λεωφορείων έως το χώρο στάθμευσης και την απόσταση από τα αμαξοστάσια έως τα κοντινά αμαξοστάσια συντήρησης. Το πρόβλημα μπορεί να ταξινομηθεί ως βελτιστοποίηση μεταφοράς στην επιχειρησιακή έρευνα. Το επίκεντρο του προβλήματος των μεταφορών είναι πώς να αντιστοιχηθεί η προσφορά προϊόντων με τη ζήτηση πωλήσεων με το χαμηλότερο κόστος. Το μοντέλο των προβλημάτων μεταφοράς περιλαμβάνει τρία βασικά σημεία: τις μεταβλητές απόφασης, τους περιορισμούς και την αντικειμενική συνάρτηση.

Η αντικειμενική συνάρτηση που προτάθηκε είναι η εξής:

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} v_{ijk} d_{ijk} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{k' \in K'} m_{ijk} v_{ijkk'} d_{kk'}$$

Η αντικειμενική συνάρτηση χωρίζεται σε δύο όρους. Ο πρώτος όρος ελαχιστοποιεί τα «νεκρά» χιλιόμετρα από τους τερματικούς σταθμούς προς τα αμαξοστάσια και ο δεύτερος όρος ελαχιστοποιεί τα «νεκρά» χιλιόμετρα από τα αμαξοστάσια έως τις αποθήκες συντήρησης. Υπολογίστηκαν εκ των προτέρων τα «νεκρά» χιλιόμετρα d_{ijk} και $d_{kk'}$.

Περιορισμοί:

- $$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} v_{ijk}^n = N_i^n$$

Ο ποσοτικός περιορισμός των συνηθισμένων λεωφορείων, το άθροισμα των συνηθισμένων λεωφορείων που κατανέμονται σε κάθε αμαξοστάσιο από τη γραμμή i πρέπει να είναι ίσο με τον συνολικό αριθμό των συνηθισμένων λεωφορείων στη γραμμή i .

- $$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} v_{ijk}^e = N_i^e$$

Η εξίσωση αυτή διασφαλίζει ότι το άθροισμα των ηλεκτρικών λεωφορείων που κατανέμονται σε κάθε αμαξοστάσιο από τη γραμμή i ισούται με τον συνολικό αριθμό των ηλεκτρικών λεωφορείων στη γραμμή i .

- $$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} v_{ijk} \leq C_k$$

Περιορισμός του εκχωρημένου αριθμού λεωφορείων στο αμαξοστάσιο k στη μέγιστη χωρητικότητα (M) των λεωφορείων που επιτρέπεται στο αμαξοστάσιο k .

- $$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} v_{ijk}^e \leq C_k^e \cdot p$$

Η εξίσωση αυτή υπολογίζει τον συνολικό αριθμό των ηλεκτρικών λεωφορείων που διατίθενται στο αμαξοστάσιο k , δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερος από τη χωρητικότητα φόρτισης του αμαξοστασίου k .

- $$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} v_{ijk} \cdot m_{ijk} \leq C_k^m$$

Η εξίσωση αυτή διασφαλίζει ότι η χωρητικότητα συντήρησης του αμαξοστασίου μπορεί να ικανοποιήσει τη μέση ημερήσια ζήτηση συντήρησης των λεωφορείων που έχουν εκχωρηθεί σε αμαξοστάσια k' .

$$\sum_{k' \in K'} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} v_{ijk'} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} v_{ijk}$$

Η εξίσωση αυτή διασφαλίζει ότι το άθροισμα των λεωφορείων που εκχωρούνται σε κάθε αποθήκη συντήρησης από το αμαξοστάσιο k είναι ισοδύναμο με τον συνολικό αριθμό λεωφορείων στο αμαξοστάσιο k.

Επεξήγηση συμβόλων:

I,i: Το σύνολο των γραμμών

J,j: Το σύνολο των τερματικών

K,k: Το σύνολο των αμαξοστασίων

K',k': Το σύνολο των αμαξοστασίων συντήρησης

d_{ijk}: Η μικρότερη απόσταση από τον τερματικό σταθμό j της γραμμής i μέχρι το αμαξοστάσιο k

d_{kk'}: Η συντομότερη απόσταση από το αμαξοστάσιο k στο k'

v_{ijk}: Ο αριθμός των λεωφορείων που εκχωρήθηκαν από τον τερματικό σταθμό j της γραμμής i στο αμαξοστάσιο k

v_{ijkⁿ}: Ο αριθμός των συνηθισμένων λεωφορείων που κατανέμονται από τον τερματικό σταθμό j της γραμμής i στο αμαξοστάσιο k

v_{ijk^e}: Ο αριθμός των αμιγώς ηλεκτρικών λεωφορείων που κατανέμονται από τον τερματικό σταθμό j της γραμμής i στο αμαξοστάσιο k

v_{ijkk'}: Ο αριθμός των λεωφορείων που εκχωρήθηκαν από τον τερματικό σταθμό j της γραμμής I στο αμαξοστάσιο k και διατηρούνται στο αμαξοστάσιο k'

Nⁿ_i: Ο αριθμός των συνηθισμένων λεωφορείων που λειτουργούν στη γραμμή i

N^e_i: Ο αριθμός των αμιγώς ηλεκτρικών λεωφορείων που λειτουργούν στη γραμμή i

Cⁿ_k: Η ικανότητα συντήρησης του αμαξοστασίου k'

C_k: Ο αριθμός στάθμευσης του αμαξοστασίου k

C^e_k: Ο αριθμός των πασσάλων φόρτισης στο αμαξοστάσιο k

P: Ποσοστό κύκλου εργασιών του σωρού φόρτισης, σε γενικές γραμμές p= 2

mijk: Η μέση ημερήσια συντήρηση των οχημάτων που εκχωρήθηκαν από τον τερματικό σταθμό j της γραμμής i στο αμαξοστάσιο k

Από τη μελέτη αυτή εξήχθη το ακόλουθο συμπέρασμα: Πρώτον, η θέση και το μέγεθος θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό των αμαξοστασίων για να μειωθεί το λειτουργικό κόστος της γραμμής. Επίσης, οι εγκαταστάσεις των αμαξοστασίων θα πρέπει να ικανοποιούν τη ζήτηση των λεωφορείων, όπως οι θέσεις στάθμευσης και οι σταθμοί φόρτισης. Δεύτερον, η λειτουργία των νέων αμαξοστασίων σχεδιασμού και η ζήτηση στάθμευσης αυτών θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την κατασκευή τους, για να διασφαλιστεί ότι μπορεί να ικανοποιηθεί η τρέχουσα ζήτηση. Θα πρέπει να δοθεί προτεραιότητα στην κατασκευή των βασικών αμαξοστασίων που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο.

Οι Fatima Al Ali και Noha M. Hassan (2017) παρουσιάζουν μία μελέτη η οποία βελτιστοποιεί την εκχώρηση λεωφορείων σε αμαξοστάσια, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τη διαθεσιμότητα των κέντρων συντήρησης σε αυτά. Αναπτύσσεται μοντέλο μεικτού ακέραιου γραμμικού προγράμματος (MILP), για τη μείωση του συνολικού λειτουργικού κόστους που σχετίζεται με τα «νεκρά» χιλιόμετρα, τη βελτιστοποίηση της εκχώρησης λεωφορείων σε αμαξοστάσια, τον καθορισμό της βέλτιστης κατανομής των κέντρων συντήρησης και την εξοικονόμηση πόρων από την πώληση ενός υπάρχον αμαξοστασίου (αξία διάσωσης). Η βέλτιστη λύση επιτεύχθηκε μέσω της σύνδεσης κάθε αμαξοστασίου με όλους τους σταθμούς λεωφορείων, λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό του κέντρου συντήρησης. Τα αποτελέσματα του αναπτυγμένου μοντέλου καθόρισαν τον βέλτιστο αριθμό, τη θέση, το μέγεθος των αμαξοστασίων και την κατανομή των κέντρων συντήρησης, επιπλέον της κατανομής των λεωφορείων στους σταθμούς. Το μοντέλο επικυρώθηκε με σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτό του περιφερειακού συστήματος διαμετακόμισης του Βανκούβερ. Προκειμένου να αξιολογηθεί το πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθοδολογίας, αναπτύχθηκε μια μελέτη.

Η αντικειμενική συνάρτηση που προτάθηκε ήταν η παρακάτω (Εξ. (1)) και υπολογίζει το ελάχιστο κόστος κατανομής λεωφορείων σε αμαξοστάσια για τη βελτιστοποίηση του αριθμού, του μεγέθους και της θέσης των αμαξοστασίων, του αριθμού και της μάρκας των κέντρων συντήρησης σε κάθε αμαξοστάσιο και της κατανομής των λεωφορείων στους σταθμούς.

$$\begin{aligned}
\text{Min } & \sum_{i=1}^{in} \sum_{j=1}^{jn} \sum_{t=1}^{tn} \sum_{b=1}^{bn} K_{ij} X_{ijtb} + \sum_{i=\text{exist}+1}^{in} \sum_{t=1}^{tn} C_{it} A_{it} \\
& + \sum_{i=1}^{in} \sum_{b=1}^{bn} CM * P_{ib} - \sum_{i=1}^{\text{exist}} O_i S_i
\end{aligned} \tag{1}$$

Με περιορισμούς:

$$\sum_{i=1}^{in} \sum_{b=1}^{bn} X_{ijtb} \geq D_{jt}, \quad \forall j, t \tag{2}$$

$$(1 + \alpha) \cdot \sum_{j=1}^{jn} \sum_{b=1}^{bn} X_{ijtb} = A_{it}, \quad \forall i, t \tag{3}$$

$$\sum_{t=1}^{tn} A_{it} R_t \leq M_i (1 - O_i), \quad \forall i = \text{exist} \tag{4}$$

$$\sum_{t=1}^{tn} A_{it} R_t \geq Z_i (1 - O_i), \quad \forall i = \text{exist} \tag{5}$$

$$\sum_{t=1}^{tn} A_{it} R_t \leq M_i Y_i, \quad \forall i = \text{new} \tag{6}$$

$$\sum_{t=1}^{tn} A_{it} R_t \geq Z_i Y_i, \quad \forall i = \text{new} \tag{7}$$

$$\sum_{j=1}^{jn} \sum_{t=1}^{tn} X_{ijtb} \leq M_i P_{ib}, \quad \forall i, b \tag{8}$$

$$\sum_{i=1}^{in} \sum_{j=1}^{jn} X_{ijtb} \leq F_{tb}, \quad \forall t, b \tag{9}$$

$$X_{ijtb} \geq 0 \quad \text{και ακέραιος}$$

$$A_{it} \geq 0 \quad \text{και ακέραιος}$$

$$P_{ib}, O_i, Y_i = 0, 1$$

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

Το X_{ijt} είναι ο αριθμός των λεωφορείων τύπου (t) και μάρκας (b) που εκχωρούνται από το αμαξοστάσιο (i) στον σταθμό εκκίνησης/τη στάση λεωφορείου (j) στην περίοδο αιχμής, ανά ημέρα. Η μεταβλητή O_i καθορίζει εάν το υπάρχον αμαξοστάσιο (i) πρέπει να παραμείνει ανοιχτό ή αν θα κλείσει και θα πωληθεί. $O_i=0$ εάν μείνει ανοιχτό και $O_i=1$ εάν κλείσει. Η μεταβλητή Y_i δείχνει εάν το νέο αμαξοστάσιο (i) πρέπει να κατασκευαστεί ή όχι, και η μεταβλητή P_{ib} δηλώνει εάν το αμαξοστάσιο (i) διαθέτει κέντρο συντήρησης για την επωνυμία (b).

Η αντικειμενική συνάρτηση στην Εξ. (1) χωρίζεται σε τέσσερις όρους. Ο πρώτος όρος ελαχιστοποιεί το κόστος των νεκρών χιλιομέτρων. Υπολογίζει το κόστος μετακίνησης μεταξύ αμαξοστασίων και σταθμών. Το κόστος του νεκρού χιλιομέτρου είναι προϋπολογισμένο. Κάθε αμαξοστάσιο έχει συνδεθεί με κάθε σταθμό μέσω των συντομότερων διαδρομών στο δίκτυο. Τα διανυόμενα χιλιόμετρα από αυτές τις διαδρομές έχουν πολλαπλασιαστεί με το κόστος ανά χιλιόμετρο και παρουσιάζονται στο μοντέλο ως (K). Είναι το συνολικό κόστος των νεκρών χιλιομέτρων της συντομότερης διαδρομής μεταξύ του αμαξοστασίου (i) στον σταθμό (j) ανά λεωφορείο.

Ο δεύτερος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης υπολογίζει το κόστος κατασκευής σε περίπτωση κατασκευής νέου αμαξοστασίου. Υπάρχουν δύο σειρές δαπανών αμαξοστασίου: κόστος κεφαλαίου (κατασκευή) και λειτουργικό κόστος. Ο Willoughby (1993) δήλωσε ότι το λειτουργικό κόστος είναι γραμμική συνάρτηση του αριθμού των λεωφορείων που είναι αποθηκευμένα στο αμαξοστάσιο, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ του οριακού λειτουργικού κόστους σε εναλλακτικές τοποθεσίες κέντρων διέλευσης. Επομένως, το λειτουργικό κόστος δεν λήφθηκε υπόψη στη βελτιστοποίηση μόνο το κόστος κεφαλαίου.

Το κόστος κατασκευής (C) (συμπεριλαμβανομένου του κόστους γης) αντιπροσωπεύει το κόστος ενός νέου αμαξοστασίου (i) ανά τύπο λεωφορείου (t). Για να τυποποιηθεί το μέγεθος των αμαξοστασίων ανεξάρτητα από τον τύπο του λεωφορείου, ορίζεται ως προς τον αριθμό των τυπικών λεωφορείων που μπορεί να φιλοξενησει. Επειδή οι άλλοι τύποι λεωφορείων έχουν διαφορετικό μέγεθος σε σύγκριση με το τυπικό λεωφορείο, το κόστος αντιπροσωπεύεται με βάση τον τύπο λεωφορείων (t). Το κόστος κατασκευής πολλαπλασιάζεται με τον συνολικό αριθμό λεωφορείων ανά τύπο (t) που διατίθεται στο αμαξοστάσιο (i).

Ο αριθμός των λεωφορείων X αντιπροσωπεύει τα ενεργά λεωφορεία στο δίκτυο. Ωστόσο, όταν ανατίθεται στο αμαξοστάσιο (i), ένα επιπλέον ποσοστό αυτών των λεωφορείων θα πρέπει να προστεθεί στον στόλο του αμαξοστασίου (i) ως εφεδρικά

λεωφορεία. Αυτά τα λεωφορεία χρησιμοποιούνται ως αντικατάσταση σε περίπτωση ατυχήματος ή για ειδικά γεγονότα που απαιτούν άμεση ανταπόκριση των λεωφορείων. Επομένως, το Ait είναι ο συνολικός αριθμός λεωφορείων ανά τύπο (t) (συμπεριλαμβανομένων των εφεδρικών λεωφορείων) που διατίθενται στο αμαξοστάσιο (i). Το κόστος διαιρείται με τον αριθμό των λεωφορείων που διατίθενται στα αμαξοστάσια λόγω της δυνατότητας επέκτασης του χρονοδιαγράμματος κατασκευής. Με άλλα λόγια, εάν το 50% της χωρητικότητας του αμαξοστασίου καταλαμβάνεται από λεωφορεία, τότε το κόστος θα είναι επίσης 50% για την κατασκευή του αμαξοστασίου.

Ο τρίτος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης αθροίζει το κόστος προσθήκης του κέντρου συντήρησης στα αμαξοστάσια. Η δυαδική μεταβλητή (P) αποφασίζει εάν το αμαξοστάσιο (i) θα έχει το κέντρο συντήρησης της μάρκας (b) ή όχι. Για βελτιστοποίηση, η μεταβλητή δεν περιορίζεται στον διαθέσιμο αριθμό κέντρων συντήρησης για κάθε μάρκα. Η μεταβλητή θα καθορίσει τελικά πολλά κέντρα συντήρησης που χρειάζονται για κάθε μάρκα και τη διανομή τους στα αμαξοστάσια. Η μεταβλητή περιορίζει επίσης τα λεωφορεία με μάρκα (b) να επιτρέπονται μόνο σε αμαξοστάσια που περιέχουν το κέντρο συντήρησης της επωνυμίας του.

Ο τέταρτος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης υπολογίζει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε περίπτωση που τα αμαξοστάσια τα οποία λειτουργούν κλείσουν ή πωληθούν. Τα υπάρχον αμαξοστάσια είναι πολύτιμα περιουσιακά στοιχεία. Ένα αμαξοστάσιο που λειτουργεί στο κέντρο της πόλης έχει μεγάλη αξία. Επειδή η αντικειμενική συνάρτηση είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους, η αξία διάσωσης αμαξοστασίου λαμβάνεται υπόψη στη μείωση του κόστους. Μία από τις επιλογές στη λήψη αποφάσεων είναι να πωληθεί ένα υπάρχον αμαξοστάσιο και να επωφεληθεί από την αξία διάσωσης του. Αυτή η επιλογή ισχύει όταν το κόστος λειτουργίας του αμαξοστασίου είναι υψηλότερο από αυτό της κατασκευής ενός νέου. Η δυαδική μεταβλητή (O) καθορίζει εάν ένα υπάρχον αμαξοστάσιο θα παραμείνει ανοιχτό ή αν θα κλείσει.

Υπάρχουν έξι περιορισμοί που σχετίζονται με αυτό το μοντέλο:

1. Ζήτηση: Εξ. (2) διασφαλίζει ότι ο αριθμός των εκχωρημένων λεωφορείων (X) του τύπου (t) που προέρχονται από διάφορα αμαξοστάσια (i) ικανοποιεί τη ζήτηση στο σταθμό (j), για κάθε σταθμό (j) στη μέγιστη περίοδο αιχμής ανά ημέρα. Η ζήτηση (D) είναι ο αριθμός των λεωφορείων που απαιτούνται για την εξυπηρέτηση όλων των δρομολογίων που ξεκινούν από το σταθμό/τερματικό (j) την περίοδο αιχμής της ημέρας. Το μοντέλο παρουσιάζει το (X) ως διαφορετικούς τύπους λεωφορείων επειδή κάθε τύπος έχει διαφορετική χωρητικότητα ή περιορισμούς διαδρομής.

2. Συνολικός αριθμός λεωφορείων σε αμαξοστάσιο: Εξ. (3) υπολογίζει τον συνολικό αριθμό των ενεργών λεωφορείων και των εφεδρικών λεωφορείων που θα

διατεθούν στο αμαξοστάσιο (i) για κάθε τύπο λεωφορείου (t). Τα εφεδρικά λεωφορεία κατανέμονται ως ποσοστό (α) του αριθμού των ενεργών λεωφορείων που υπολογίζονται. Αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των λεωφορείων που βρίσκονται σε ετοιμότητα στα αμαξοστάσια σε περίπτωση απρογραμματίστης διακοπής της υπηρεσίας λεωφορείων, όπως ατυχήματα ή άλλα συμβάντα που απαιτούν άμεση ανταπόκριση των λεωφορείων.

3. Μέγεθος υφιστάμενου αμαξοστασίου: Η μέγιστη χωρητικότητα του αμαξοστασίου έχει μετατραπεί στον αριθμό των τυπικών λεωφορείων που μπορεί να χωρέσει ένα αμαξοστάσιο (M). Επειδή οι διαφορετικοί τύποι διαύλου (t) έχουν διαφορετικά μεγέθη, το R είναι η αναλογία μεγεθών άλλων τύπων σε σύγκριση με τον τυπικό τύπο διαύλου. Στην εξ. (4), ο αριθμός των λεωφορείων από διαφορετικούς τύπους (t) πολλαπλασιάζεται με την αναλογία (R) για να ληφθεί ο ισοδύναμος αριθμός τυπικών λεωφορείων για κάθε αμαξοστάσιο (i). Οι εξ. (4) και (5) εγγυώνται ότι ο εκχωρημένος αριθμός λεωφορείων στο υπάρχον αμαξοστάσιο (i) δεν θα υπερβαίνει τη μέγιστη χωρητικότητα (M) λεωφορείων που επιτρέπεται σε ένα υπάρχον αμαξοστάσιο (i), ούτε θα είναι μικρότερος από την ελάχιστη χωρητικότητα (Z). Συνδέεται με τη μεταβλητή (O), για να αντικατοπτρίζει την απόφαση εάν θα κλείσει ή θα διατηρηθεί το υπάρχον αμαξοστάσιο.

4. Μέγεθος νέου αμαξοστασίου: Η δυαδική μεταβλητή (Y) αποφασίζει εάν υπάρχει ανάγκη να δημιουργηθεί ένα νέο αμαξοστάσιο ή όχι. Αυτή η μεταβλητή θα καθοριστεί με βάση τη βελτιστοποίηση μεταξύ του κόστους κατασκευής ενός νέου αμαξοστασίου ή διατήρησης ενός υπάρχον. Εάν το Y ισούται με ένα, σημαίνει ότι η κατασκευή ενός νέου αμαξοστασίου θα μειώσει το κόστος για την επίτευξη της βέλτιστης λύσης. Αντίθετα, εάν το Y ισούται με μηδέν, δεν χρειάζεται να χτιστεί ένα νέο αμαξοστάσιο στη συγκεκριμένη τοποθεσία. Στην περίπτωση κατασκευής νέου αμαξοστασίου, η εξ. (6) περιορίζει τον εκχωρημένο αριθμό λεωφορείων σε ένα νέο αμαξοστάσιο (i) στη μέγιστη χωρητικότητα (M) λεωφορείων που επιτρέπεται στο νέο αμαξοστάσιο (i). Η εξ. (7) διασφαλίζει ότι υπάρχουν αρκετά λεωφορεία (ελάχιστη χωρητικότητα Z), που απαιτούν την κατασκευή νέου αμαξοστασίου.

5. Περιορισμός κέντρου συντήρησης: Η δυαδική μεταβλητή (P) στην Εξ. (1) καθορίζει εάν ένα κέντρο συντήρησης επωνυμίας θα εκχωρηθεί σε ένα συγκεκριμένο αμαξοστάσιο. Αυτό αποτρέπει την εκχώρηση λεωφορείων στο αμαξοστάσιο που δεν διαθέτει κέντρο συντήρησης για τη συγκεκριμένη μάρκα λεωφορείου. Επομένως, η εξ. (8), διασφαλίζει ότι τα λεωφορεία με συγκεκριμένη μάρκα (b) που εκχωρούνται σε αμαξοστάσια περιέχουν το κέντρο συντήρησης της μάρκας της. Εάν το P_{ib} ισούται με ένα, το αμαξοστάσιο (i) θα έχει ένα κέντρο συντήρησης για το εμπορικό σήμα (b), το οποίο επιτρέπει σε όλα τα λεωφορεία (X) με αυτό το εμπορικό σήμα (b) να εισέρχονται στο αμαξοστάσιο (i).

6. Μέγιστος στόλος λεωφορείων: Εξ. (9) διασφαλίζει ότι ο αριθμός των λεωφορείων τύπου μάρκας δεν θα υπερβαίνει τον διαθέσιμο στόλο. Η εκ νέου ανάθεση των λεωφορείων και η αναδιανομή του κέντρου συντήρησης θα επηρεάσει τον αριθμό των λεωφορείων που χρειάζονται. Η απόφαση αυτή θα πρέπει να περιοριστεί στη διαθέσιμη μάρκα τύπου στόλου λεωφορείων.

Η βέλτιστη κατανομή είναι αρκετά διαφορετική από εκείνη την περίπτωση που δόθηκε προσοχή στη διαθεσιμότητα των κέντρων συντήρησης σε ένα συγκεκριμένο αμαξοστάσιο. Μια μείωση κατά 17% στο κόστος των νεκρών χιλιομέτρων ανά λεωφορείο επιτεύχθηκε σε αυτή τη μελέτη κατά τη σύγκριση της βέλτιστης κατανομής λαμβάνοντας υπόψη, και όχι, τη διαθεσιμότητα του κέντρου συντήρησης. Η βέλτιστη ανάθεση στα αμαξοστάσια έχει επίσης ως αποτέλεσμα σημαντική μείωση του κόστους. Η προτεινόμενη μεθοδολογία υπογραμμίζει την ανάγκη ενσωμάτωσης τυχόν περιορισμών πόρων κατά την εξέταση του προβλήματος της κατανομής. Καθώς το μέγεθος του στόλου λεωφορείων μεγαλώνει, η βέλτιστη κατανομή θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντική μείωση του κόστους.

Οι Mahadikar κ.α. (2015) παρουσιάζουν μία ολοκληρωμένη μελέτη νεκρών χιλιομέτρων όλων των διαδρομών στην εταιρεία μεταφορών της μητρόπολης Μπανγκαλόρ στην Ινδία (Bangalore Metropolitan Transport Corporation , BMTC), που πραγματοποιήθηκε μαζί με ένα σχέδιο ελαχιστοποίησης των χιλιομέτρων αυτών. Η ανάλυση του ποσοστού των «νεκρών» χιλιομέτρων βοηθά στην κατανομή νέων διαδρομών και στην επιλογή της κατάλληλης τοποθεσίας για νέα αμαξοστάσια, ενώ ελαχιστοποιεί τα «νεκρά» χιλιόμετρα. Το μοντέλο ελαχιστοποίησης «νεκρών» χιλιομέτρων που διατυπώθηκε ήταν πρόβλημα σύνθεσης μικτού ακέραιου γραμμικού προγράμματος (MILP, mixed integer linear program) και επιλύθηκε για να επιτευχθεί η βέλτιστη λύση λαμβάνοντας υπόψη τη χωρητικότητα του κάθε αμαξοστασίου και τη χρονική περίοδο λειτουργίας για ένα μοντέλο δικτύου, το οποίο μπορεί περαιτέρω να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση μεγάλων δικτύων που καλύπτουν ολόκληρες τις διαδρομές της πόλης.

Η ελαχιστοποίηση των «νεκρών» χιλιομέτρων προέκυψε από την εξίσωση:

$$\text{Minimize } \sum_{d=1}^m \sum_{r=1}^n (adr + fdr) xdr$$

Με περιορισμούς:

$$\sum_{d=1}^m xdr = 1 \quad \forall r = 1, \dots, n \quad (1)$$

$$edt = ed(t-1) - \sum_{r \in Ld(t-1)} xdr + \sum_{r \in Gd(t-1)} xdr \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \forall d = 1, \dots, m & \quad \forall t = 2, \dots, T \\ edt \leq cd & \quad \forall d = 1, \dots, m \quad \forall t = 1, \dots, T \end{aligned} \quad (3)$$

$$\sum_{d=1}^m edt = M \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (4)$$

$$xdr \in \{0, 1\} \quad \forall d = 1, \dots, m \quad \forall r = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$edt \geq 0 \quad \forall d = 1, \dots, m \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (6)$$

Ο περιορισμός (1) υποδηλώνει ότι η διαδρομή συνδέεται με ένα μόνο αμαξοστάσιο. Ο περιορισμός (2) υποδηλώνει τον πραγματικό χρόνο των λεωφορείων σε ένα αμαξοστάσιο. Ο περιορισμός (3) διασφαλίζει ότι ο αριθμός των λεωφορείων στο αμαξοστάσιο d , σε κάθε περίοδο t , είναι μικρότερος ή ίσος με τη χωρητικότητα αυτού του αμαξοστασίου. Ο περιορισμός (4) διασφαλίζει ότι ο αριθμός των λεωφορείων σε όλα τα αμαξοστάσια είναι ίσος με τον αριθμό των λεωφορείων σε ολόκληρη την εταιρεία. Οι περιορισμοί (5) και (6) αντιπροσωπεύουν το εύρος των μεταβλητών.

Επεξήγηση συμβόλων:

d : αμαξοστάσια ($d = 1, \dots, m$)

r : χρονοδιαγράμματα ($r = 1, \dots, n$)

t : περίοδοι ($t = 1, \dots, T$)

adr : «νεκρά» χιλιόμετρα που σχετίζονται με το pull-out ταξίδι (από αμαξοστάσιο σε σημείο εκκίνησης διαδρομής) του χρονοδιαγράμματος r από το αμαξοστάσιο d

fdr : «νεκρά» χιλιόμετρα που σχετίζονται με pull-in ταξίδι (σημείο τερματισμού διαδρομής σε αμαξοστάσιο) του προγράμματος r από το αμαξοστάσιο d

cd: χωρητικότητα αμαξοστασίου d

M: συνολικός αριθμός λεωφορείων για d αμαξοστάσια σε μια εταιρεία

Ldt: αριθμός λεωφορείων που αναχωρούν από το αμαξοστάσιο d την περίοδο t

Gdt: αριθμός λεωφορείων που πηγαίνουν στο αμαξοστάσιο d την περίοδο t

xdr: δυαδική μεταβλητή που γίνεται 1 εάν το pull-out ταξίδι του προγράμματος r σχετίζεται με το αμαξοστάσιο d, διαφορετικά γίνεται 0

edt: αριθμός λεωφορείων στα αμαξοστάσια d στην αρχή της περιόδου t

Για την επίλυση εφαρμόστηκε η μέθοδος διακλάδωσης και αποκοπής στο λογισμικό CPLEX, το οποίο παρέχει έναν αποτελεσματικό τρόπο επίλυσης προβλημάτων προγράμματος Integer και MILP. Η μείωση των «νεκρών» χιλιομέτρων όχι μόνο μειώνει το λειτουργικό κόστος, αλλά και βελτιώνει την αποδοτικότητα λειτουργίας καθώς μειώνονται οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων αφετηρίας/τέρματος αμαξοστασίου και διαδρομής. Η βελτιστοποίηση κατανομής λεωφορείων βοηθά επίσης στην αποφυγή παράλληλης λειτουργίας λεωφορείων σε μια διαδρομή μέχρι ένα ορισμένο σημείο, καθώς κατανέμει λεωφορεία με βάση την απόσταση μεταξύ των αμαξοστασίων προς τα σημεία έναρξης/τέλους διαδρομής. Στην παρούσα μελέτη, πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση της κατανομής λεωφορείων για το κεντρικό τμήμα.

Οι Fusco κ.α. (2012) ασχολούνται με το πρόβλημα του σχεδιασμού του συστήματος διέλευσης για έναν μικτό στόλο ηλεκτρικών λεωφορείων και λεωφορείων εσωτερικής καύσης σε μια αστική περιοχή. Εισάγουν ένα μοντέλο για την επιλογή τύπου οχήματος που περιλαμβάνει τον υπολογισμό του εσωτερικού και εξωτερικού κόστους διάρκειας ζωής. Αυτό το μοντέλο υποθέτει ότι το σύνολο των διαδρομών είναι σταθερό. Αντίθετα, εισάγει διαφορετικές εναλλακτικές λύσεις γρήγορης φόρτισης και περιορισμούς που σχετίζονται με την αυτονομία της μπαταρίας, την κατανάλωση ενέργειας και τη μεταφορά ισχύος από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Έχουν εισαχθεί επίσης πολυάριθμες υποθέσεις για την εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας για μεσαία και μεγάλα ηλεκτρικά λεωφορεία, τα οποία δεν είναι ακόμη διαθέσιμα στην αγορά. Το μοντέλο έχει εφαρμοστεί για την προσομοίωση των λειτουργιών λεωφορείων στο διάδρομο διέλευσης κατά μήκος της οδού Tiburtina στη Ρώμη, Ιταλία, για διαφορετικές συνθέσεις του στόλου

ηλεκτρικών λεωφορείων και εναλλακτικές λύσεις φόρτισης: σε στάσεις λεωφορείων ή σε τερματικούς σταθμούς και αμαξοστάσια.

Ο σχεδιασμός της αντιστοίχισης ηλεκτρικών λεωφορείων διαμορφώνεται ως πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο συνίσταται στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους διάρκειας ζωής του συστήματος διαμετακόμισης, συμπεριλαμβανομένων των εσωτερικών και εξωτερικών δαπανών για την παροχή ενέργειας, εκτός από τις επενδύσεις στόλου και το λειτουργικό κόστος της υπηρεσίας διαμετακόμισης. Οι περιορισμοί που τέθηκαν περιλαμβάνουν κλασικές εξισώσεις διατήρησης ενέργειας και ροής οχημάτων, καθώς και περιορισμούς χωρητικότητας για φόρτιση και φορτία επιβατών.

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι το άθροισμα που περιλαμβάνει το κόστος επένδυσης, συντήρησης, λειτουργίας, περιβαλλοντικό και χρήση. Αυτά υποδεικνύονται αντίστοιχα ως CI, CM, CO, CE και CU στις εξισώσεις από (1) έως (5). Οι δύο πρώτοι όροι είναι οι συνεισφορές κόστους των διαφορετικών στοιχείων του συστήματος διαμετακόμισης και της παροχής δικτύου. συγκεκριμένα: οχήματα και ηλεκτρικές εγκαταστάσεις σε αμαξοστάσια, τερματικούς σταθμούς και στάσεις λεωφορείων. Τα τρία τελευταία στοιχεία κόστους σχετίζονται με τις επιδόσεις του συστήματος. Αυτές τμηματοποιούνται κατά χρονική περίοδο ή προκειμένου να γίνει διάκριση μεταξύ των ωρών αιχμής και μη, τόσο για τις μεταφορικές όσο και για τις ενεργειακές ανάγκες.

$$CI = \sum_{d=1}^D ci_d(W_d) + \sum_{z=1}^Z ci_z(W_z) + \sum_{s=1}^S ci_s(W_s) + \sum_{k=1}^K ci_k m_k \quad (1)$$

$$CM = \sum_{d=1}^D cm_d(W_d) + \sum_{z=1}^Z cm_z(W_z) + \sum_{s=1}^S cm_s(W_s) + \sum_{k=1}^K cm_k m_k \quad (2)$$

$$CO = \sum_{h=1}^T \sum_{j=1}^J f_j^h \left(\sum_{a=1}^A \delta_{a,j} l_a + \sum_{z=1}^Z t_{z,j} \right) \cdot cd + \sum_{h=1}^T \sum_{j=1}^J f_j^h \sum_{a=1}^A \delta_{a,j} l_a \sum_{k=1}^K \delta_{j,k} co_k \quad (3)$$

$$CE = \sum_{h=1}^T \sum_{j=1}^J f_j^h \sum_{a=1}^A \delta_{a,j} l_a \sum_{k=1}^K \delta_{k,j} ce_k^k \left(v_{a,h}^k \cdot p_{a,j}^h \right) \quad (4)$$

$$CU = \sum_{h=1}^T \sum_{j=1}^J \lambda_j \left(\sum_{a=1}^A p_{a,j}^h t_{a,j}^h + \beta \sum_{s=1}^S q_{s,j}^h w_{s,j}^h + \beta \sum_{z=1}^Z q_{z,j}^h w_{z,j}^h \right) \quad (5)$$

Τα σύμβολα στις εξισώσεις έχουν την εξής σημασία:

CI: ετήσιο κόστος επένδυσης για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις και οχήματα

cid: ενιαίο κόστος επένδυσης για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις ισχύος Wd σε αμαξοστάσιο λεωφορείων d

ciz: ενιαίο κόστος επένδυσης για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις ισχύος Wz στον τερματικό σταθμό λεωφορείων z

cis: ενιαίο κόστος επένδυσης για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις ισχύος Ws στη στάση λεωφορείου s

cik: ενιαίο κόστος επένδυσης για οχήματα τύπου k

CM: ετήσιο κόστος συντήρησης για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις και οχήματα

cmd: ενιαίο κόστος συντήρησης ηλεκτρικών εγκαταστάσεων ισχύος Wd σε αμαξοστάσιο λεωφορείων d

cmz: ενιαίο κόστος συντήρησης για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις ισχύος Wz στον τερματικό αγωγό z

cms: ενιαίο κόστος συντήρησης ηλεκτρικών εγκαταστάσεων ισχύος Ws στη στάση λεωφορείου s

cmk: ενιαίο κόστος συντήρησης για οχήματα τύπου k

CO: ετήσιο λειτουργικό κόστος για οχήματα

cod: ωρομίσθιο οδηγών λεωφορείων

coκ: ενιαίο κόστος λειτουργίας ανά km για οχήματα τύπου k

fhj: συχνότητα στη γραμμή j σε ωριαία χρονική περίοδο h

tha,j: χρόνος ταξιδιού στη σύνδεση a για λεωφορειακή γραμμή j σε ωριαία χρονική περίοδο h

thz,j: χρόνος αναμονής οδηγών στο τερματικό z για τη γραμμή λεωφορείων j την ωριαία χρονική περίοδο h

la: μήκος του συνδέσμου a

$\delta_{a,j} = 1$ αν ο σύνδεσμος a ανήκει στη γραμμή j , διαφορετικά $=0$

$\delta_{k,j} = 1$ εάν το όχημα του τύπου k έχει αντιστοιχιστεί στη γραμμή j και 0 διαφορετικά

CU: ετήσιο κόστος των χρηστών

lj: η τιμή του χρόνου για τους χρήστες της γραμμής j

β : συντελεστής στάθμισης του χρόνου αναμονής σε σχέση με το χρόνο ταξιδιού επί του οχήματος

$\rho_{ha,j}$: αριθμός φορτίου επιβατών στη σύνδεση a για τη λεωφορειακή γραμμή j την ωριαία χρονική περίοδο h

$q_{hz,j}$: αριθμός επιβατών που περιμένουν στον τερματικό σταθμό z για τη γραμμή λεωφορείου j την ωριαία χρονική περίοδο h

$q_{hs,j}$: αριθμός επιβατών που περιμένουν στη στάση λεωφορείου s για τη γραμμή λεωφορείου j την ωριαία χρονική περίοδο h

$w_{hs,j}$: χρόνος αναμονής επιβατών στη στάση λεωφορείου s για τη γραμμή λεωφορείου j την ωριαία χρονική περίοδο h

$w_{hz,j}$: χρόνος αναμονής επιβατών στον τερματικό σταθμό z για τη γραμμή λεωφορείου j την ωριαία χρονική περίοδο h

CE: ετήσιο περιβαλλοντικό κόστος για ηλεκτρικά οχήματα

ce_{ak} : ενιαίο περιβαλλοντικό και ενεργειακό κόστος στη ζεύξη a για όχημα τύπου k

$v_{ha,k}$: εμπορική ταχύτητα στη ζεύξη a για όχημα τύπου k σε ωριαία χρονική περίοδο h

h: ωριαία χρονική περίοδος

T: χρονική περίοδος μελέτης, που καλύπτει ολόκληρη τη διάρκεια ζωής των φυτών και των οχημάτων

D: αριθμός αμαξοστασίων

Z: αριθμός τερματικών

S: αριθμός στάσεων λεωφορείων

K: αριθμός τύπων οχημάτων

J: αριθμός λεωφορειακών γραμμών

A: αριθμός συνδέσμων

Τα λειτουργικά κόστη συνήθως αποτελούνται από το κόστος των οδηγών, τις καταναλώσεις ενέργειας, τα ελαστικά, τα λιπαντικά, τους φόρους, την ασφάλιση και το γενικό κόστος. Ωστόσο, σε αυτήν την οικονομική ανάλυση, αντί να χωριστεί το ενεργειακό κόστος σε λειτουργικό και εξωτερικό, υπολογίζεται το κόστος κατανάλωσης ενέργειας στο σύνολό του και αθροίζεται την ενέργεια και το περιβάλλον κόστος, θεωρώντας ότι το δεύτερο είναι ανάλογο του πρώτου. Αυτή η γενική συνάρτηση κόστους ενέργειας και περιβάλλοντος, που υποδεικνύεται ως CE στην εξίσωση (4), περιλαμβάνει επίσης το κόστος θορύβου, το οποίο θεωρείται συνήθως ανάλογο της απόστασης που διανύθηκε, με παράγοντες που εξαρτώνται από τις ώρες της ημέρας ή της νύχτας καθώς και από το αστικό περιβάλλον. Οι ειδικοί φόροι κατανάλωσης αγνοούνται επειδή είναι απλώς μεταβιβάσεις μεταξύ διαφορετικών μελών της κοινωνίας. Έτσι, το λειτουργικό κόστος CO αντιπροσωπεύει τα άλλα κόστη, εκτός από το ενεργειακό. Το κόστος των οδηγών είναι ανάλογο του συνολικού χρόνου οδήγησης, ενώ το υπόλοιπο κόστος, για λιπαντικά και κατανάλωση ελαστικών, είναι ανάλογο με τη συνολική απόσταση που διανύθηκε. Τα γενικά κόστη και άλλα λειτουργικά κόστη που σχετίζονται με τη χρήση του οχήματος, όπως τα έξοδα ασφάλισης, μπορούν να θεωρηθούν ως ανάλογα με τον αριθμό των οχημάτων και έτσι μπορούν να υπολογιστούν μαζί με το κόστος συντήρησης. Τέλος, το κόστος CU των χρηστών είναι ανάλογο με το άθροισμα του χρόνου που αφιερώνουν οι χρήστες επί του οχήματος και του χρόνου αναμονής σε στάσεις και τερματικούς σταθμούς λεωφορείων.

Οι περιορισμοί περιλαμβάνουν εξισώσεις κατανάλωσης ενέργειας (6) για όλες τις διαδρομές που εκτελούνται σε κάθε γραμμή j . Εξισώσεις διατήρησης της ροής οχημάτων (7), που σχετίζεται με τον αριθμό των οχημάτων, την ταχύτητα λειτουργίας και τη συχνότητα για κάθε γραμμή λεωφορείων (8) στον ρυθμό ενεργειακής ισχύος, οι οποίοι απαιτούν η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται σε κάθε γραμμή να είναι μικρότερη από τη μέγιστη φόρτιση και τις στάσεις χρόνου σε κάθε σταθμό επαναφόρτισης, που βρίσκεται σε τερματικούς σταθμούς, στάσεις λεωφορείων, αμαξοστάσια. Οι χρόνοι αναμονής σε στάσεις λεωφορείων και τερματικούς σταθμούς (9) καθορίζονται από τις συνθήκες στη συχνότητα γραμμής και τον προγραμματισμένο χρόνο φόρτισης, οι οποίοι εξαρτώνται από τον τύπο του φορτιστή και της μπαταρίας.

$$L_j = \sum_{h=1}^{H(j)} f_j^h \sum_{a=1}^A \delta_{a,j} l_a \sum_{k=1}^K \delta_{k,j} g_a^k (v_{a,k}^h, p_{a,j}^h) \quad (6)$$

$$m_j^h = f_j^h \sum_{a=1}^A \delta_{a,j} \frac{l_a}{v_{a,j}^h} \quad (7)$$

$$L_j \leq \max_h \left\{ m_j^h \right\} \sum_{d=1}^D \delta_{j,d} \eta_d W_d \Delta t_{j,d} + \sum_{h=1}^{H(j)} f_j \sum_{s=1}^S \delta_{j,s} \eta_s W_s \Delta t_s + \sum_{h=1}^{H(j)} f_j \sum_{z=1}^Z \delta_{j,z} \eta_z W_z \Delta t_z \quad (8)$$

$$t_{s,j}^h = \max \left\{ \frac{1}{f_j^h}, \Delta t_{j,s} \right\} \quad t_{z,j}^h = \max \left\{ \frac{1}{f_j^h}, \Delta t_{j,z} \right\} \quad (9)$$

Έχουν εισαχθεί τα ακόλουθα σύμβολα:

L_j : Ενέργεια που καταναλώνεται για τη γραμμή j σε μια μέση ημέρα

g_{ka} : μοναδιαία κατανάλωση ενέργειας για όχημα τύπου k στη ζεύξη a

m_{hj} : αριθμός οχημάτων σε υπηρεσία στη γραμμή j την ωριαία χρονική περίοδο h

$v_{ha,j}$: εμπορική ταχύτητα στη ζεύξη a για όχημα που λειτουργεί στη γραμμή j σε ωριαία χρονική περίοδο h

$\delta_{j,d} = 1$ εάν η γραμμή j χρησιμοποιεί το αμαξοστάσιο d και 0 διαφορετικά

$\delta_{j,s} = 1$ αν η στάση s ανήκει στη γραμμή j και 0 διαφορετικά

$\delta_{j,z} = 1$ εάν η γραμμή j χρησιμοποιεί το άκρο z και το 0 διαφορετικά

$H(j)$: ημερήσιος χρόνος λειτουργίας της γραμμής j

W_d : ονομαστικός ρυθμός ισχύος στο αμαξοστάσιο d

W_s : ονομαστικός ρυθμός ισχύος στη στάση s

W_z : ονομαστικός ρυθμός ισχύος στο τέρμα z

η_d : απόδοση του φορτιστή σε αμαξοστάσιο d

η_s : απόδοση του φορτιστή στη στάση s

η_z : απόδοση του φορτιστή στο τέρμα z

$\Delta t_{j,d}$: χρόνος στάσης στο αμαξοστάσιο d για λεωφορεία της γραμμής j

Δt_d : μέσος χρόνος στάσης στη στάση s

$\Delta t_{j,z}$: μέσος χρόνος στάσης στον τερματικό σταθμό z για λεωφορεία της γραμμής j

Το μέγεθος του στόλου για κάθε τύπο οχήματος k προσδιορίζεται εφαρμόζοντας την εξίσωση (7) την ώρα αιχμής και λαμβάνοντας έτσι $\max_j\{f_j^h\}$. Η βέλτιστη συχνότητα διαδρομής υπολογίζεται με την εφαρμογή του λεγόμενου «κανόνα της τετραγωνικής ρίζας» (Mohring, 1976), ο οποίος ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος τόσο για τους χρήστες όσο και για τους χειριστές με την υπόθεση της ομοιόμορφης άφιξης επιβατών στη στάση λεωφορείου:

$$f_j^h = \sqrt{\frac{\lambda_j \sum_{a=1}^A \delta_{a,j} p_{a,j}^h}{2 \sum_{k=1}^K \delta_{j,k} c o_k}} \quad (10)$$

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα σενάρια με ηλεκτρικά οχήματα έχουν υψηλότερο κόστος επένδυσης και προσωπικού. Ωστόσο, αντισταθμίζονται από χαμηλότερο περιβαλλοντικό και ενεργειακό κόστος, εάν οι φορτιστές στις στάσεις λεωφορείων έχουν αρκετή υψηλή ισχύ ώστε να περιορίζουν τόσο τον αριθμό των εξοπλισμένων στάσεων λεωφορείων όσο και τον χρόνο επαναφόρτισης.

Μία ακόμη έρευνα των Keraptsoglou κ.α. (2013) αναλύει το μοντέλο ελαχιστοποίησης «νεκρών» χιλιομέτρων των λεωφορείων. Στόχος τους είναι η κατανομή των λεωφορείων στα αμαξοστάσια με τέτοιο τρόπο ώστε να μειώνονται τα λειτουργικά έξοδα του Οργανισμού Αστικών Συγκοινωνιών Αθήνας, χωρίς παρεμβολές στις υπηρεσίες εξυπηρέτησης επιβατών. Για να επιτευχθεί αυτό αναπτύσσεται ένας υβριδικός γενετικός αλγόριθμος στο σύστημα λεωφορείων της Αθήνας.

Υπάρχει ένα αρχικό μοντέλο που προτείνεται από τους Keraptsoglou et al. (2009) και λαμβάνει υπόψη δύο σημαντικές παραδοχές. Πρώτον, εισάγει την έννοια των συγκροτημάτων για την κατανομή των λεωφορείων στους τερματικούς σταθμούς. Κάθε τερματικός σταθμός (άκρο διαδρομής) εξυπηρετεί έναν αριθμό διαδρομών λεωφορείων με τους ίδιους ή διαφορετικούς τύπους λεωφορείων. Τα οχήματα του ίδιου τύπου που ξεκινούν από το ένα άκρο, θα μπορούσαν να ομαδοποιηθούν και να εκχωρηθούν στο ίδιο αμαξοστάσιο ανεξάρτητα από τη διαδρομή που έχουν προγραμματιστεί να εξυπηρετούν. Δεύτερον, το αρχικό μοντέλο εξετάζει τη μεγιστοποίηση της χρήσης των αμαξοστασίων, υποδηλώνοντας ότι, από

επιχειρησιακή άποψη, θα πρέπει να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ της χωρητικότητας του αμαξοστασίου και των σταθμευμένων λεωφορείων. Με βάση αυτές τις υποθέσεις, το αρχικό μοντέλο κατανομής λεωφορείων σε αμαξοστάσια διατυπώνεται ως εξής:

$$\min Z = w_1 \cdot \sum_{s \in S} \sum_{get \in G_{et}} X_{get s} \cdot K_{get s} + w_2 \cdot \sum_{s \in S} \left(\frac{\sum_{get \in G_{et}} X_{get s} \cdot a_t \cdot N_{get}}{C_s} - I \right)^2$$

Όπου το κόστος των «νεκρών» χιλιομέτρων προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$K_{get s} = (d_{se} + d_{es}) \cdot c_t \cdot N_{get}$$

Και η ιδανική πληρότητα του κάθε αμαξοστασίου από τον:

$$I = \frac{\sum_{get \in G_{et}} a_t \cdot N_{get}}{\sum_s C_s}$$

Με περιορισμούς:

$$\begin{aligned} \sum_{s \in S} X_{get s} &= 1 \quad \forall get \in G_{et} \\ \sum_{get \in G_{et}} X_{get s} \cdot a_t \cdot N_{get} &\leq C_s \quad \forall s \in S \\ \sum_{get \in G_{et}} X_{get s} \cdot a_t \cdot N_{get} &\geq C_{s, \min} \quad \forall s \in S \\ \sum_{s \in S'} X_{get s} &= 1 \quad \forall get \in G'_{et} \end{aligned}$$

Επεξήγηση συμβόλων:

S: Σύνολο αμαξοστασίων

s: Αμαξοστάσιο ($S = \{s\}$)

E: Σύνολο τερματικών σταθμών

e : Τερματικός σταθμός ($E = \{e\}$)

T : Σύνολο τύπων λεωφορείων

t : Τύπος λεωφορείου ($T = \{t\}$)

Get : Σύνολο συγκροτημάτων λεωφορείων για κάθε τερματικό e και τύπο t

get : Συγκρότημα λεωφορείων για κάθε τερματικό e και τύπο t ($Get = \{get\}$)

N_{get} : Αριθμός λεωφορείων συγκροτήματος get

ct : Λειτουργικό κόστος (ανά km) κάθε λεωφορείου τύπου t

$ds, e/de, s$: Απόσταση μεταξύ αμαξοστασίου s και τερματικού e

I : Επίπεδο ιδανικής πληρότητας αμαξοστασίων

C_s : Χωρητικότητα αμαξοστασίων για κανονικά λεωφορεία

$C_{min, s}$: Ελάχιστη χωρητικότητα αμαξοστασίων

$K_{get s}$: Κόστος «νεκρών» χιλιομέτρων συγκροτήματος g και αμαξοστασίου s

$X_{get s}$: 1 αν το συγκρότημα πάει στο αμαξοστάσιο, 0 στην αντίθετη περίπτωση

w_1, w_2 : Συντελεστές βαρύτητας

at : Συντελεστής μεγέθους λεωφορείου

Η αντικειμενική συνάρτηση επιδιώκει να ελαχιστοποιήσει το συνολικό κόστος «νεκρών» χιλιομετρικών και την ανισορροπία πληρότητας όλων των αμαξοστασίων. Η τετραγωνική μορφή του τμήματος ανισορροπίας της αντικειμενικής συνάρτησης διασφαλίζει ότι λαμβάνει θετικές τιμές. Οι περιορισμοί υπαγορεύουν ότι κάθε συγκρότημα εκχωρείται μόνο σε ένα αμαξοστάσιο, καθώς επίσης ικανοποιούνται οι περιορισμοί μέγιστης και ελάχιστης χωρητικότητας. Τέλος, δεδομένου ότι ορισμένα συγκροτήματα πρέπει να ανατεθούν εκ των προτέρων σε συγκεκριμένα αμαξοστάσια, προστίθεται ο τελευταίος περιορισμός. Αυτό σημαίνει ότι ένα συγκρότημα g μπορεί να φιλοξενηθεί μόνο από αμαξοστάσια s ενός υποσυνόλου $S = \{s\} \subseteq S$ (που σημαίνει ότι το συγκρότημα ανήκει σε ένα υποσύνολο $G(S) \subseteq G$). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο προτελευταίος περιορισμός είναι συμπληρωματικός του συντελεστή εξισορρόπησης πληρότητας της αντικειμενικής συνάρτησης.

Στη μελέτη αυτή γίνεται μια επιπλέον προσθήκη στην αντικειμενική συνάρτηση που είναι το λειτουργικό κόστος αμαξοστασίου που είναι:

$$K_{op, get s} = C_s \cdot N_{get} + C_{m, s} \cdot e^{\lambda \cdot (\frac{N_{get}}{C_s})}$$

Όπου:

c_s : Μέσο λειτουργικό κόστος ανά όχημα για αμαξοστάσια, για ένα προκαθορισμένο επίπεδο πληρότητας

cm,s : Οριακό κόστος λειτουργίας ανά επιπλέον όχημα για αμαξοστάσιο s

λ : Συντελεστής προσαρμογής

Και η τελική γραμμική εξίσωση είναι:

$$\min Z = w_1 \cdot \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{g_{et} \in G_{et}} X_{g_{et}s} \cdot K_{g_{et}s} + w_2 \cdot \sum_{s \in \mathcal{S}} \left(\frac{\sum_{g_{et} \in G_{et}} X_{g_{et}s} \cdot a_t \cdot N_{g_{et}}}{C_s} - I \right)^2 + w_3 \cdot \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{g_{et} \in G_{et}} X_{g_{et}s} \cdot K_{op,g_{et}s}$$

Το πρόβλημα είναι ένα μοντέλο μικτού ακέραιου προγραμματισμού (MIP). Η πρόθεση είναι να διερευνηθούν οι δυνατότητες του SGA/REG+GDHC σε ένα μεγάλο μικτό ακέραιο-τετραγωνικό μοντέλο προγραμματισμού. Η υπολογιστική απόδοση και η ποιότητα της λύσης του προτεινόμενου αλγορίθμου βρίσκει ότι βελτιώθηκαν σε σύγκριση με το απλό SGA. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής δείχνουν ότι η εξέταση του κόστους αμαξοστασίου μπορεί να διαφοροποιήσει τα αποτελέσματα ως προς το μέγεθος της εξοικονόμησης, ενώ η επίδραση των περιορισμών στην κατανομή λεωφορείων σε συγκεκριμένα αμαξοστάσια θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά αυτά τα κέρδη. Επίσης, η χρήση συγκεκριμένων γραμμών λεωφορείων αντί για συγκροτήματα οδηγεί σε βελτιωμένη εξισορρόπηση μεταξύ των αμαξοστασίων.

2.4 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης που έγινε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Καταβλήθηκε προσπάθεια παράθεσης και ανάλυσης διαφόρων ερευνών βέλτιστης κατανομής λεωφορείων σε αμαξοστάσια. Από την σύνθεση των βασικών τους σημείων προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Έχουν πραγματοποιηθεί ελάχιστες μελέτες που εξετάζουν τον βέλτιστο καταμερισμό στόλων λεωφορείων σε αμαξοστάσια. Το σύνολο αυτών που

παρατίθενται εστιάζει στη μορφοποίηση ενός γραμμικού μαθηματικού προτύπου ελαχιστοποίησης των μη παραγωγικών αποστάσεων και κόστους.

- Τα μαθηματικά μοντέλα που προέκυψαν είναι πρότυπα γραμμικών συστημάτων που εφαρμόζονται σε δίκτυα αστικών συγκοινωνιών. Σημαντικά στοιχεία για την επεξεργασία και τελική επιλογή των μεταβλητών αποτελούν οι αποστάσεις μεταξύ στάσεων και αμαξοστασίων του αστικού δικτύου συγκοινωνιών, το πλήθος και το είδος των λεωφορείων κάθε γραμμής, οι δυναμικότητες των αμαξοστασίων, τα συγκροτήματα των λεωφορείων και το λειτουργικό κόστος των αμαξοστασίων.
- Για τη δημιουργία αξιόπιστων προτύπων πολύ σημαντικό ρόλο παίζει η εγκυρότητα και πληρότητα των στοιχείων, καθώς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα της διαδικασίας επίλυσης. Μία βάση δεδομένων πλούσια σε στοιχεία με τη σωστή επεξεργασία και επιλογή του κατάλληλου μοντέλου, θα δώσει σωστά αποτελέσματα για τον καταμερισμό στόλου λεωφορείων σε αμαξοστάσια, με βάση την ελαχιστοποίηση κόστους «νεκρών» χιλιομέτρων.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία το αντικείμενο της έρευνας είναι η βέλτιστη κατανομή του στόλου λεωφορείων του Οργανισμού Αστικών Συγκοινωνιών Αθήνας στα ήδη διαθέσιμα αμαξοστάσια της Αττικής, ώστε να γίνει η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους του φορέα. Για να γίνει αυτό γίνεται η μορφοποίηση ενός μαθηματικού μοντέλου μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. Το σύνολο των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί για τη μορφοποίηση του μοντέλου αυτού, αφορούν το σύνολο του εκτεταμένου δικτύου λεωφορειακών γραμμών του Ο.Α.Σ.Α.

3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 Γενικά

Το μαθηματικό μοντέλο για την επίλυση της βέλτιστης κατανομής στόλου λεωφορείων σε αμαξοστάσια αποτελεί βασικό βήμα προσέγγισης στη παρούσα διπλωματική εργασία. Για να γίνει αυτό εφικτό γίνεται χρήση ενός μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (mixed integer linear programming), ο οποίος αποτελεί τμήμα του γενικότερου γραμμικού προγραμματισμού. Ο γραμμικός προγραμματισμός είναι μία μαθηματική τεχνική που βοηθά στο σχεδιασμό και τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τις απαραίτητες εξισορροπήσεις για την κατανομή των πόρων. Υπολογίζει τη μικρότερη και τη μεγαλύτερη τιμή του αντικειμενικού στόχου καθώς επίσης εγγυάται και την άριστη λύση του διατυπωμένου μοντέλου.

Το μαθηματικό μοντέλο του προβλήματος περιλαμβάνει:

- Τις μεταβλητές απόφασης
- Τις παραμέτρους/ συντελεστές
- Τους περιορισμούς/συνθήκες
- Την αντικειμενική συνάρτηση/αντικειμενικό στόχο, ο οποίος μπορεί να αποτελείται από επιμέρους στόχους.

3.2 Γενική περιγραφή προβλήματος

Ο Οργανισμός Αστικών Συγκοινωνιών Αθήνας αποτελείται από ένα στόλο περίπου 1500 λεωφορείων, που εξυπηρετούν τις λεωφορειακές γραμμές της Αττικής. Παράλληλα διαθέτει και ένα σύνολο 6 αμαξοστασίων τα οποία είναι εξειδικευμένα και έχουν συγκεκριμένη χωρητικότητα. Το ζητούμενο είναι η βέλτιστη κατανομή των λεωφορείων αυτών στα συγκεκριμένα αμαξοστάσια, λαμβάνοντας υπόψη μια σειρά παραμέτρων και περιορισμών καθώς και το κόστος που έχει η κατανομή αυτή με τη μορφή αντικειμενικής συνάρτησης.

Τα δεδομένα του προβλήματος καταμερισμού λεωφορείων σε αμαξοστάσια, οι μεταβλητές, οι παράμετροι, οι περιορισμοί και η αντικειμενική συνάρτηση παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

3.3 Δεδομένα

Τα δεδομένα του προβλήματος αποτελούν οι διάφοροι τύποι και τα είδη λεωφορείων, οι λεωφορειακές γραμμές, τα αμαξοστάσια του λεωφορειακού δικτύου και οι αποστάσεις των αμαξοστασίων από τις αφετηρίες και τα τέρματα των λεωφορειακών γραμμών κ.α.. Ακολουθεί επεξήγηση της κάθε κατηγορίας δεδομένων.

3.3.1 Τύποι και είδη λεωφορείων

Ο στόλος του Ο.Α.Σ.Α. απαρτίζεται από λεωφορεία διαφόρων ειδών και τύπων. Τα είδη των λεωφορείων χαρακτηρίζονται από το μέγεθός τους και είναι μικρά (midi), μεσαίου/κανονικού (standard) μεγέθους και αρθρωτά (articulated). Οι τύποι των λεωφορείων χαρακτηρίζονται από το είδος καυσίμου και είναι πετρελαιοκίνητα, φυσικού αερίου και ηλεκτρικά. Η ύπαρξη διαφορετικών τύπων και ειδών λεωφορείων επηρεάζει το πρόβλημα καταμερισμού του στόλου στα αμαξοστάσια διότι:

1. Δεν υποστηρίζουν όλα τα αμαξοστάσια του διάφορους τύπους λεωφορείων.
2. Ο κάθε τύπος και είδος λεωφορείου έχουν διαφορετικό λειτουργικό κόστος, το οποίο επηρεάζει τη συνάρτηση κόστους.
3. Το κάθε είδος λεωφορείου, λόγω διαφορετικού μεγέθους, έχει αντίκτυπο στις απαιτήσεις χώρου στάθμευσης στα αμαξοστάσια.

3.3.2 Λεωφορειακές γραμμές

Κάθε λεωφορειακή γραμμή διαθέτει μία αφετηρία και ένα τέρμα του δρομολογίου της. Έχει επίσης ένα σύνολο λεωφορείων που την απαρτίζουν, τα οποία μπορεί να είναι διαφορετικού είδους και τύπου. Τέλος ένα σύνολο λεωφορείων κάθε είδους και τύπου ξεκινάει και τελειώνει την βάρδιά του από την αφετηρία και ένα άλλο από το τέρμα της λεωφορειακής γραμμής. Γίνεται η παραδοχή ότι μισά λεωφορεία ξεκινάνε από την αφετηρία της γραμμής και μισά από το τέρμα της. Στην περίπτωση κυκλικής διαδρομής δρομολογίου όλα τα λεωφορεία ξεκινούν από την ίδια αφετηρία.

3.3.3 Συγκροτήματα και υπογραμμές

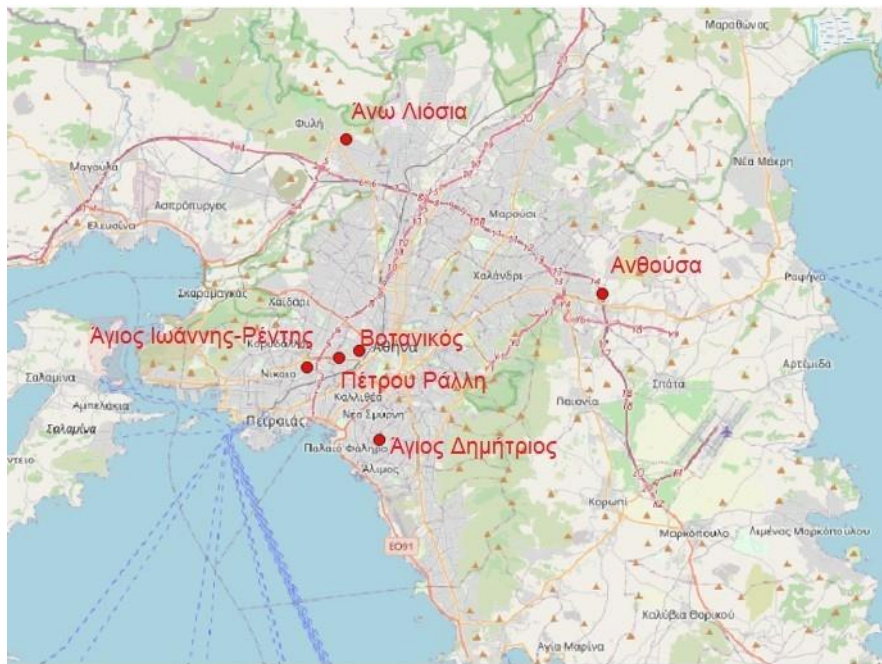
Για λόγους προγραμματισμού υπάρχουν λεωφορειακές γραμμές που θα πρέπει να εξυπηρετούνται από το ίδιο αμαξοστάσιο καθώς επίσης και τμήματα λεωφορειακών γραμμών που πρέπει να εξυπηρετούνται από διαφορετικά αμαξοστάσια, κυρίως λόγω ελαχιστοποίησης νεκρών χιλιομέτρων. Για τους λόγους αυτούς εισάγεται ο όρος της υπογραμμής. Υπογραμμή καλείται ένα υποσύνολο της γραμμής με την οποία έχει ίδια αφετηρία και τέρμα, αλλά μπορεί να κατανέμεται σε διαφορετικό αμαξοστάσιο. Η υπογραμμή διαιρεί τα λεωφορεία μίας γραμμής σε ομάδες οι οποίες εξυπηρετούνται από το ίδιο αμαξοστάσιο. Ως συγκρότημα ορίζεται το σύνολο των υπογραμμών που πρέπει να ανατεθούν σε ένα αμαξοστάσιο (συμπεριλαμβανομένων των λεωφορείων τα οποία εξυπηρετούν διαφορετικές λεωφορειακές γραμμές).

3.3.4 Αμαξοστάσια

Τα αμαξοστάσια του δικτύου των λεωφορειακών γραμμών της Αττικής είναι έξι(6) και είναι ήδη χωροθετημένα στην περιοχή, όπως φαίνονται και στο σχήμα 3.1. Τα απαραίτητα χαρακτηριστικά που θα χρειαστούν για την επίλυση του μοντέλου στη παρούσα εργασία είναι η μέγιστη επιτρεπτή χωρητικότητά τους, η θέση τους στο

χάρτη της Αττικής και οι τύποι των λεωφορείων που μπορούν να εξυπηρετήσουν. Τα αμαξοστάσια αυτά είναι στις περιοχές:

- Άγιος Δημήτριος
- Άγιος Ιωάννης Ρέντης
- Βοτανικός
- Ανθούσα
- Άνω Λιόσια
- Πέτρου Ράλλη



Σχήμα 3.1 Χάρτης Αττικής με τη θέση των αμαξοστασίων (αρχείο QGIS)

3.3.5 Αποστάσεις-«Νεκρά» χιλιόμετρα

Απαραίτητο δεδομένο για την επίλυση του προβλήματος αποτελούν τα «νεκρά» χιλιόμετρα. «Νεκρά» χιλιόμετρα ονομάζονται τα χιλιόμετρα που διανύει ένα λεωφορείο από το αμαξοστάσιο προς την αφετηρία του στην αρχή της βάρδιάς του, και από το τέρμα έως το αμαξοστάσιο κατά το τέλος της βάρδιάς του. Συνεπώς τα χιλιόμετρα αυτά τα διανύει κάθε λεωφορείο δύο φορές κατά τη λειτουργία του σε μία ημέρα, στα οποία δεν εξυπηρετεί επιβατικό κοινό. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βέλτιστη κατανομή λεωφορείων στα αμαξοστάσια λαμβάνοντας υπόψη (ελαχιστοποιώντας) τα χιλιόμετρα αυτά.

3.4 Περιορισμοί

Οι περιορισμοί του προβλήματος διασφαλίζουν την τήρηση των ελάχιστων και μέγιστων τιμών των παραμέτρων του προβλήματος καταμερισμού λεωφορείων σε αμαξοστάσια. Παρακάτω αναφέρονται οι περιορισμοί:

1. Περιορισμός ακεραιότητας: Κάθε λεωφορείο λεωφορείων πρέπει να κατανεμηθεί σε ένα και μόνο αμαξοστάσιο.
2. Περιορισμός μέγιστης χωρητικότητας αμαξοστασίου: Το σύνολο των λεωφορείων που μπορούν να κατανεμηθούν σε κάθε αμαξοστάσιο πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο από τη μέγιστη χωρητικότητά του.
3. Περιορισμός εξυπηρέτησης: Κάθε λεωφορείο πρέπει να κατανεμηθεί σε αμαξοστάσιο το οποίο μπορεί να εξυπηρετήσει το είδος και τον τύπο του κάθε λεωφορείου.

3.5 Αναλυτική περιγραφή προβλήματος

Σε αυτό το μέρος της εργασίας αναφέρονται οι έννοιες που χρησιμοποιούνται στο πρόβλημα, εκφρασμένες με μαθηματικό τρόπο.

3.5.1 Περιγραφή εννοιών

Λεωφορειακές γραμμές

Κάθε λεωφορειακή γραμμή ℓ , με $\ell \in L = \{1, 2, 3, \dots, n\}$, έχει μία στάση που είναι η αφετηρία της S_i και μία στάση που είναι το τέρμα της F_i . Για $\forall i \in I = \{1, 2, 3, \dots, m\}$.

Τύποι λεωφορείων

Κάθε λεωφορείο έχει ένα τύπο t , ο οποίος μπορεί να είναι ηλεκτρικού, πετρελαιοκίνητου ή φυσικού αερίου και έχει λειτουργικό κόστος C_t και συντελεστή προσαρμογής μεγέθους a_t . Το λειτουργικό κόστος C_t του κάθε τύπου είναι ίδιο με το λειτουργικό κόστος γραμμής C_ℓ . Ο συντελεστής μεγέθους στοχεύει στην αναγωγή όλων των διαφόρων μεγεθών λεωφορείων σε κανονικό μέγεθος. Ισχύει ότι $\forall t \in T = \{1, 2, 3\}$

Λεωφορεία

Κάθε γραμμή ℓ διαθέτει ένα πλήθος λεωφορείων που ξεκινούν από την αφετηρία N_{Sei} και ένα που ξεκινούν από το τέρμα N_{Fei} , και ισχύει $N_{Se} + N_{Fe} = N_{ei}$. Τα λεωφορεία αυτά ονομάζονται λεωφορεία αφετηρίας και λεωφορεία τέρματος αντίστοιχα. Ο αριθμός των λεωφορείων αυτών μπορεί να είναι και μηδενικός, άρα $N_{Sei} \geq 0$ και $N_{Fei} \geq 0$. Λεωφορεία αφετηρίας χαρακτηρίζονται τα λεωφορεία που ξεκινούν και τελειώνουν τη βάρδιά τους από την αφετηρία της γραμμής. Λεωφορεία τέρματος χαρακτηρίζονται αυτά που ξεκινούν και τελειώνουν τη βάρδιά τους από το τέρμα της γραμμής. Σημείο εκκίνησης ονομάζεται το σημείο από το οποίο ξεκινάει και τελειώνει ένα λεωφορείο τη βάρδιά του, είτε είναι η αφετηρία είτε το τέρμα της γραμμής στην οποία ανήκει. Γίνεται η παραδοχή ότι για κάθε γραμμή που δεν εκτελεί κυκλική διαδρομή μισά λεωφορεία ξεκινούν από την αφετηρία και μισά από το τέρμα της γραμμής.

Αμαξοστάσια

Κάθε αμαξοστάσιο j διαθέτει μία μέγιστη C_{max} και μία ελάχιστη χωρητικότητα C_{min} . Και ισχύει $j \in J = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$.

«Νεκρά» χιλιόμετρα

«Νεκρά» ονομάζονται τα χιλιόμετρα που διανύει ένα λεωφορείο από το σημείο εκκίνησής του i (στάση αφετηρίας ή τέρματος γραμμής) έως ένα αμαξοστάσιο j . Συνεπώς τα χιλιόμετρα αυτά τα διανύει κάθε λεωφορείο δύο φορές κατά τη λειτουργία του σε μία ημέρα, στην αρχή και στο τέλος της βάρδιάς του. Η απόσταση αυτή συμβολίζεται ως X_{ij} .

Κόστος «νεκρών» διαδρομών

Το κόστος των «νεκρών» χιλιομέτρων των λεωφορείων είναι το κόστος των διαδρομών που διανύει κάθε λεωφορείο από το αμαξοστάσιο j προς την αφετηρία της βάρδιάς του i και από το τέρμα της βάρδιάς του προς το αμαξοστάσιο. Οι δύο αυτές διαδρομές δεν εξυπηρετούν το επιβατικό κοινό και επομένως είναι αναγκαία η μείωση των χιλιομέτρων αυτών που θα επιφέρει και μείωση του κόστους στον οργανισμό αστικών συγκοινωνιών.

Κάθε λεωφορείο εκτελεί δύο φορές κατά τη διάρκεια της βάρδιάς του τα χιλιόμετρα αυτά, μία στην αρχή και μία στο τέλος. Στην αρχή της βάρδιάς του για να πάει από το αμαξοστάσιο στην αφετηρία και στο τέλος για να πάει από το τέρμα στο αμαξοστάσιο. Γίνεται υπόθεση ότι τα λεωφορεία που ξεκινούν από την αφετηρία του δρομολογίου της γραμμής τελειώνουν τη βάρδιά τους στην ίδια στάση και το αντίστροφο. Επομένως η «νεκρή» απόσταση είναι το διπλάσιο της απόστασης αμαξοστάσιο-αφετηρία. Το κόστος της «νεκρής» διαδρομής είναι η «νεκρή» απόσταση επί το λειτουργικό κόστος του κάθε τύπου λεωφορείου.

Συμπερασματικά το άθροισμα των «νεκρών» χιλιομέτρων των λεωφορείων κάθε γραμμής ℓ που αντιστοιχούν σε ένα αμαξοστάσιο j , αποτελείται από το άθροισμα των «νεκρών» διαδρομών των λεωφορείων που το απαρτίζουν και εκφράζεται με τον παρακάτω τύπο.

$$h_{\ell j} = 2 * \sum_i \sum_j N_{\ell i} * X_{ij} * y_{\ell j}, \quad \forall \ell \in L \quad (2)$$

Όπου $y_{\ell j}$ ισούται με 1 αν η γραμμή ℓ αντιστοιχηθεί σε αμαξοστάσιο j , 0 στην αντίθετη περίπτωση.

Ιδανική πληρότητα

Η ιδανική πληρότητα για όλα τα αμαξοστάσια είναι το σύνολο των λεωφορείων όλων των αμαξοστασίων (σύνολο λεωφορείων αμαξοστασίων N_j) επί τον συντελεστή μεγέθους τους προς το σύνολο των μέγιστων χωρητικότητων όλων των αμαξοστασίων:

$$I = \frac{\sum at * N_j}{\sum C_{max}} \quad (4)$$

Κόστος Ισοκατανομής

Αν θεωρήσουμε ιδανική κατανομή το ποσοστό πληρότητας (πλήθος λεωφορείων επί τον συντελεστή μεγέθους του τύπου του προς τη μέγιστη χωρητικότητα του αμαξοστασίου) τότε η ποσότητα που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί στην αντικειμενική συνάρτηση του παραπάνω προτύπου είναι η:

$$\sum_j \left(\frac{\sum y \ell_j^{*at} N_j}{C_s} - I \right)^2 \quad (3)$$

Όπου I είναι η ιδανική πληρότητα του κάθε αμαξοστασίου.

Το κόστος ισοκατανομής θα πρέπει να αυξάνεται όσο η πληρότητα κάποιου αμαξοστασίου αποκλίνει από την ιδανική. Αυτό επιτυγχάνεται με το να τεθεί το κόστος ισοκατανομής ίσο με το άθροισμα των τετραγώνων της διαφοράς της πληρότητας του κάθε αμαξοστασίου από την ιδανική.

3.5.2 Περιγραφή μαθηματικού προτύπου

Παρακάτω παρουσιάζεται η αναλυτική περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου.

Αναλυτική περιγραφή συμβόλων:

J : Σύνολο των υπαρχόντων αμαξοστασίων

j : Αμαξοστάσιο

I : Σύνολο τερματικών στάσεων (αφετηρίες και τέρματα γραμμής)

i : Σημείο τερματικού σταθμού

L : Σύνολο λεωφορειακών γραμμών

ℓ : Λεωφορειακή γραμμή

C_ℓ : Μέσο λειτουργικό κόστος γραμμής (€/km)

X_{ij} : Απόσταση αμαξοστασίου j με τερματικό i

$N_{\ell i}$: Αριθμός λεωφορείων γραμμής ℓ που πάνε σε αφετηρία i

N_j : Αριθμός λεωφορείων αμαξοστασίων j

C_{max} : Μέγιστη χωρητικότητα αμαξοστασίου j σε λεωφορεία

$y_{\ell j}$: 1 αν η γραμμή ℓ αντιστοιχηθεί σε αμαξοστάσιο j , 0 στην αντίθετη περίπτωση

a_t : Συντελεστής προσαρμογής μεγέθους λεωφορείου

I : Ιδανική πληρότητα αμαξοστασίου

k_1, k_2 : Συντελεστές βαρύτητας

Αντικειμενική συνάρτηση

$$\min Z = k_1 * \sum h_{\ell} y_{\ell} * C_{\ell} + k_2 * \sum \left(\frac{\sum y_{\ell j} * a_t * N_j}{C_s} - I \right)^2 \quad (1)$$

όπου $h_{\ell} y_{\ell} = 2 * \sum_i \sum_j N_{\ell i} * X_{ij} * y_{\ell j}, \forall \ell \in L$

Περιορισμοί

- Περιορισμός ακεραιότητας: $\sum_j y_{\ell j} = 1, \forall \ell \in L$

Κάθε γραμμή λεωφορείων ℓ αντιστοιχίζεται σε ένα και μόνο αμαξοστάσιο j .

- Περιορισμός μέγιστης χωρητικότητας αμαξοστασίων

$$\sum_{\ell} N_{\ell i} * a_t * y_{\ell j} \leq C_{max}, \forall j \in J$$

Η χωρητικότητα κάθε αμαξοστασίου j σε λεωφορεία είδους t πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση από τη μέγιστη χωρητικότητα του αμαξοστασίου C_{max} .

- Περιορισμός εξυπηρέτησης αμαξοστασίων

$$\sum y_{\ell j} = 1, \forall \ell \in L'$$

Μία γραμμή ℓ μπορεί να αντιστοιχίζεται σε αμαξοστάσια ενός υποσυνόλου $J', J' \subseteq J$, υποδηλώνοντας ότι η συγκεκριμένη γραμμή ℓ ανήκει σε ένα υποσύνολο γραμμών $L' \subseteq L$. Κάθε γραμμή ℓ μπορεί να αντιστοιχηθεί μόνο σε αμαξοστάσιο j που το υποστηρίζουν με εγκαταστάσεις ανεφοδιασμού και συντήρησης. Για παράδειγμα στο συγκεκριμένο πρόβλημα τα λεωφορεία τα οποία κινούνται με φυσικό αέριο εξυπηρετούνται μόνο από τα αμαξοστάσια που διαθέτουν εγκαταστάσεις φυσικού αερίου και είναι η Ανθούσα και τα Άνω Λιόσια. Επομένως $J' = \{2, 3\}$.

3.6 Συμπεράσματα

Το προτεινόμενο μοντέλο ανήκει στην κατηγορία του μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. Λόγω του περιορισμού της ακεραιότητας είναι πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού και λόγω του κόστους ισοκατανομής εισάγεται στην αντικειμενική συνάρτηση ένας δευτεροβάθμιος όρος.

Η αντικειμενική συνάρτηση του προτεινόμενου μαθηματικού προτύπου αποτελείται από τις συνιστώσες του κόστους μη παραγωγικών οχηματοχιλιόμετρων και του κόστους ισοκατανομής. Ενώ οι περιορισμοί που εισάγονται στο μοντέλο διασφαλίζουν τις απαιτήσεις του φορέα σύμφωνα με τον προγραμματισμό και τους εργασιακούς κανόνες που έχει θέσει.

4 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα γίνει αναφορά σε όλα τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, στη διαδικασία συλλογής τους καθώς και της επεξεργασία τους. Επίσης θα γίνει η περιγραφή της εφαρμογής της μεθοδολογίας που επιλέχθηκε.

Στην υποενότητα που αναφέρεται η επεξεργασία των στοιχείων θα γίνει παρουσίαση του τρόπου εισαγωγής τους στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και στο πρόγραμμα Excel-Open Solver.

4.2 Συλλογή στοιχείων

Για τη πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και της βελτιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης, που αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, απαιτείται μεγάλος όγκος στοιχείων και δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα τα στοιχεία συλλέχθηκαν από τον Οργανισμό Αστικών Συγκοινωνιών Αθήνας (Ο.Α.Σ.Α.) και αφορούν το σύνολο του δικτύου αστικών λεωφορειακών γραμμών της Αττικής και πιο συγκεκριμένα την ευρύτερη περιοχή της Αθήνας.

Δεδομένα που αφορούν τους τύπους λεωφορείων

Για τα λεωφορεία που απαρτίζουν τις λεωφορειακές γραμμές των αστικών συγκοινωνιών χρειάστηκαν τα στοιχεία λειτουργίας τους, ο αριθμός κάθε είδους, το μήκος τους, ο συντελεστής προσαρμογής μεγέθους τους, το είδος κατανάλωσης καυσίμου καθώς και το μέσο κόστος κατανάλωσης καυσίμου €/km. Όλα τα προηγούμενα στοιχεία είναι απαραίτητα για την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου και τη βέλτιστη κατανομή των λεωφορείων στα αμαξοστάσια. Πιο συγκεκριμένα ο Ο.Α.Σ.Α. έχει κατανέμει τα 1115 οχήματα σε 257 λεωφορειακές γραμμές που εκτελούν διαφορετικά δρομολόγια. Ο αριθμός αφετηριών και

τερμάτων ανέρχεται στα 186 και τα λεωφορεία είναι τριών διαφορετικών κατηγοριών κατανάλωσης καυσίμου: ηλεκτρικά, θερμικά, φυσικού αερίου και τριών ειδών μεγεθών: μικρά, συνήθη, αρθρωτά. Στον πίνακα 4.1 αναφέρονται αναλυτικά τα στοιχεία αυτά.

Πίνακας 4.1 Στοιχεία λεωφορείων Ο.Α.Σ.Α.

Τύπος	Μήκος (m)	Συντελεστής προσαρμογής μεγέθους	Αριθμός οχημάτων	Μέσο κόστος κατανάλωσης καυσίμου (€/Km)
Μικρά λεωφορεία	8	1	105	3
Συνήθη λεωφορεία πετρελαιοκίνητα	12	1	236	3
Συνήθη λεωφορεία ηλεκτρικά	12	1	313	2,5
Συνήθη λεωφορεία φυσικού αερίου	12	1	201	1,5
Αρθρωτά λεωφορεία	18	1,2	259	3

LINE	NAME	VEH SIZE	VEH NUM	VEH TYI
021	ΚΑΝΙΓΓΟΣ-ΓΚΥΖΗ	Midi	3	H
022	ΑΚΑΔΗΜΙΑ-Ν.ΚΥΨΕΛΗ	Midi	6	H
024	ΑΓΙΟΙ ΑΝΑΡΓΥΡΟΙ-ΣΤ.ΚΑΤΩ ΠΑΤΗΣΙΑ	Standard	1	CNG
025	ΙΠΠΟΚΡΑΤΟΥΣ-ΠΡΟΦ.ΔΑΝΙΗΛ	Midi	4	H
026	ΙΠΠΟΚΡΑΤΟΥΣ-ΒΟΤΑΝΙΚΟΣ	Midi	4	H
027	ΙΠΠΟΚΡΑΤΟΥΣ-ΟΡΦΕΩΣ	Midi	3	H
032	ΓΟΥΔΗ-ΜΑΡΑΣΛΕΙΟΣ(ΣΧΟΛΙΚΗ)	Standard	0	Θ
035	ΑΝΩ ΚΥΨΕΛΗ-ΠΕΤΡΑΛΩΝΑ-ΤΑΥΡΟΣ	EM	7	Θ
036	ΣΤ.ΚΑΤΕΧΑΚΗ-ΣΤ.ΠΑΝΟΡΜΟΥ-ΓΑΛΑΤΣΙ-ΚΥΨΕΛΗ	Standard	9	H
040	ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΣΥΝΤΑΓΜΑ	Articulated	14	Θ
046	ΜΟΥΣΕΙΟ-ΕΛΛΗΝΟΡΩΣΩΝ	EM	5	Θ
049	ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΟΜΟΝΟΙΑ	Standard	11	H
051	ΟΜΟΝΟΙΑ-ΥΠΕΡ.ΛΕΩΦ.ΚΗΦΙΣΟΥ(μέσωΑΚΑΔ.ΠΛΑΤ)	Standard	6	H
052	ΣΤ.ΥΠΕΡ.ΛΕΩΦ.ΚΗΦΙΣΟΥ-ΣΤ.ΕΛΑΙΩΝΑ	Midi	2	H
054	ΠΕΡΙΣΣΟΣ-ΛΑΜΠΡΙΝΗ-ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ	Standard	6	H
057	ΟΜΟΝΟΙΑ-ΛΟΦΟΣ ΣΚΟΥΖΕ	Midi	3	H
060	ΑΚΑΔΗΜΙΑ-ΛΥΚΑΒΗΤΤΟΣ	EM	2	Θ
101	ΑΛΙΜΟΣ-ΕΛΛΗΝΙΚΟ	EM	2	Θ
106	ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ-ΣΤ.ΣΥΓΓΡΟΥ ΦΙΞ	Standard	4	Θ
109	ΣΤ.ΑΓ.ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ-ΑΝΩ ΚΑΛΑΜΑΚΙ	Standard	4	Θ
112	ΑΓ.ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ-ΣΤ.ΔΑΦΝΗ	Standard	4	Θ
115	ΓΛΥΦΑΔΑ-ΒΟΥΛΙΑΓΜΕΝΗ-ΚΙΤΣΙ	Standard	1	Θ
116	ΓΛΥΦΑΔΑ-ΒΑΡΔΗ-ΚΙΤΣΙ	Standard	2	Θ

Σχήμα 4.1 Τμήμα αρχείου επεξεργασίας

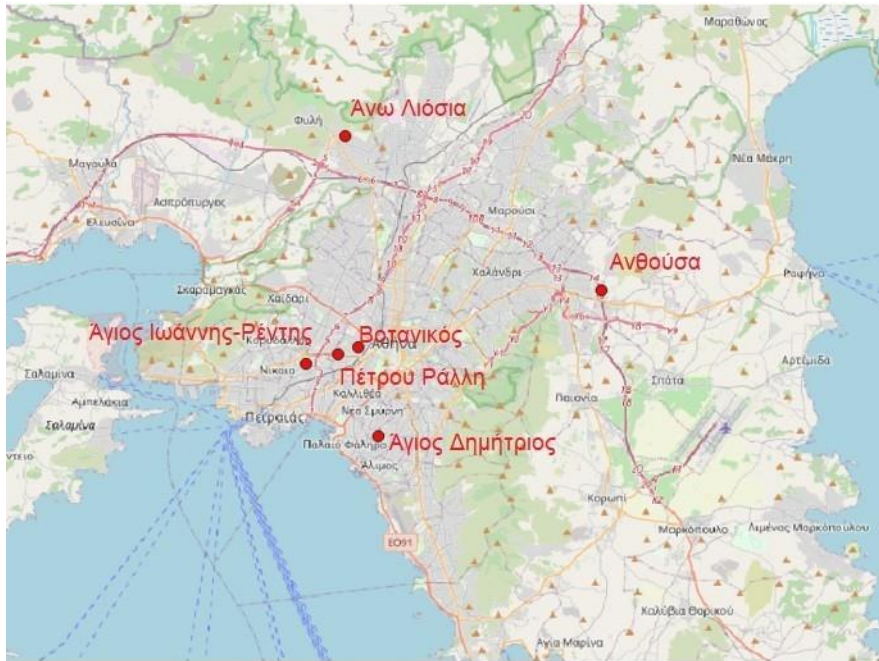
Χαρακτηριστικά αμαξοστασίων

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν και αφορούν τα χαρακτηριστικά των αμαξοστασίων είναι ο αριθμός τους, η θέση τους, η χωρητικότητά τους καθώς και ο τύπος του κάθε λεωφορείου που μπορούν να εξυπηρετήσουν. Συνολικά υπάρχουν 6 αμαξοστάσια στην Αττική που μπορούν να εξυπηρετήσουν τα παραπάνω λεωφορεία και αυτά είναι: Βοτανικός, Άγιος Ιωάννης- Ρέντη, Πέτρου Ράλλη, Άγιος Δημήτριος, Ανθούσα και Άνω Λιόσια. Στα αμαξοστάσια αυτά μπορούν συνολικά να σταθμεύσουν 1700 οχήματα. Μόνο δύο από αυτά (Άγιος Ιωάννης- Ρέντης και Βοτανικός) εξυπηρετούν όλα τα είδη λεωφορείων καθώς για τα υπόλοιπα έχουν γίνει δύο διαφορετικές παραδοχές δυναμικότητας εξυπηρέτησης. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται αναλυτικά η εξυπηρέτηση κάθε αμαξοστασίου για τα δύο διαφορετικά σενάρια που έγιναν σε σχέση με τη δυναμικότητα εξυπηρέτησης στη παρούσα διπλωματική εργασία. Τα τελικά σενάρια που γίνονται είναι τέσσερα καθώς συμπεριλαμβάνεται και η υπόθεση κόστους ισοκατανομής.

Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά αμαξοστασίων

Αμαξοστάσια	Χωρητικότητα(αριθμός λεωφορείων)	Υποστηριζόμενοι τύποι λεωφορείων (Σενάριο 1 ^ο)	Υποστηριζόμενοι τύποι λεωφορείων (Σενάριο 2 ^ο)
ΒΟΤΑΝΙΚΟΣ	340	Όλοι	Όλοι
ΑΓ. ΙΩΑΝΝΗΣ ΡΕΝΤΗΣ	360	Όλοι	Όλοι
ΠΕΤΡΟΥ ΡΑΛΛΗ	375	Εκτός από αρθρωτά	Εκτός από ηλεκτρικά και αρθρωτά
ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ	120	Όλοι	Εκτός από ηλεκτρικά
ΑΝΘΟΥΣΑ	270	Εκτός από αρθρωτά και φυσικού αερίου	Εκτός από ηλεκτρικά, αρθρωτά και φυσικού αερίου
ΑΝΩ ΛΙΟΣΙΑ	235	Εκτός από φυσικού αερίου	Εκτός από ηλεκτρικά και φυσικού αερίου

Η χωρητικότητα των αμαξοστασίων αναφέρεται σε συνήθη μεγέθη λεωφορείων.



Σχήμα 4.2 Χάρτης Αττικής με τη θέση των αμαξοστασίων (αρχείο QGIS)

Δεδομένα που αφορούν τις αποστάσεις μεταξύ αφετηριών/τερμάτων και αμαξοστασίων («νεκρά» χιλιόμετρα)

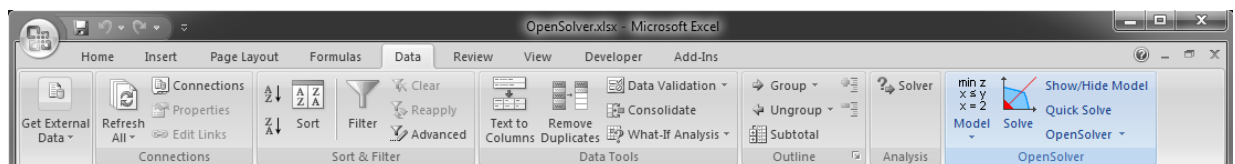
Οι αποστάσεις μεταξύ αφετηριών και τερμάτων και αμαξοστασίων έχουν υπολογιστεί σε Km και έχουν εξαχθεί έπειτα από τη χρήση του προγράμματος QGIS. Τα χιλιόμετρα αυτά εισάγονται στην αντικειμενική συνάρτηση ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος αυτών, κατανέμοντας τα λεωφορεία του Ο.Α.Σ.Α. στα αμαξοστάσια που διαθέτει.

Χ _{ij}	start	25ΗΣ ΜΑΡΤΙΟΥ (ΚΕΡΑΤΣΙΝΙ)	ΑΜΑΞΟΣΤΑΣΙΟ ΒΟΤΑΝΙΚΟΥ	Α. ΛΙΟΣΙΑ (ΠΑΝΟΡΑΜΑ)	ΑΒΕΡΩΦ	ΑΓ. ΑΝΑΓΥΡΟΙ	ΑΓ. ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ
station	Average of Άγιος Δημήτριος	12471	22605	20574	11796	14149	12097
	Average of Αγ. Ιωάννης Ρέντης	7063	14301	16405	9760	9980	4519
	Average of Βοτανικός	10945	14482	14213	5532	7787	4214
	Average of Πέτρου Ράλλη	8199	15220	15923	6914	9498	4961
	Average of Ανθούσα	26786	31028	23481	19518	18649	19394
	Average of Άνω Λιόσια	22064	16322	3887	15574	9437	10305

Σχήμα 4.3 Τμήμα αρχείου επεξεργασίας χιλιομετρικών αποστάσεων

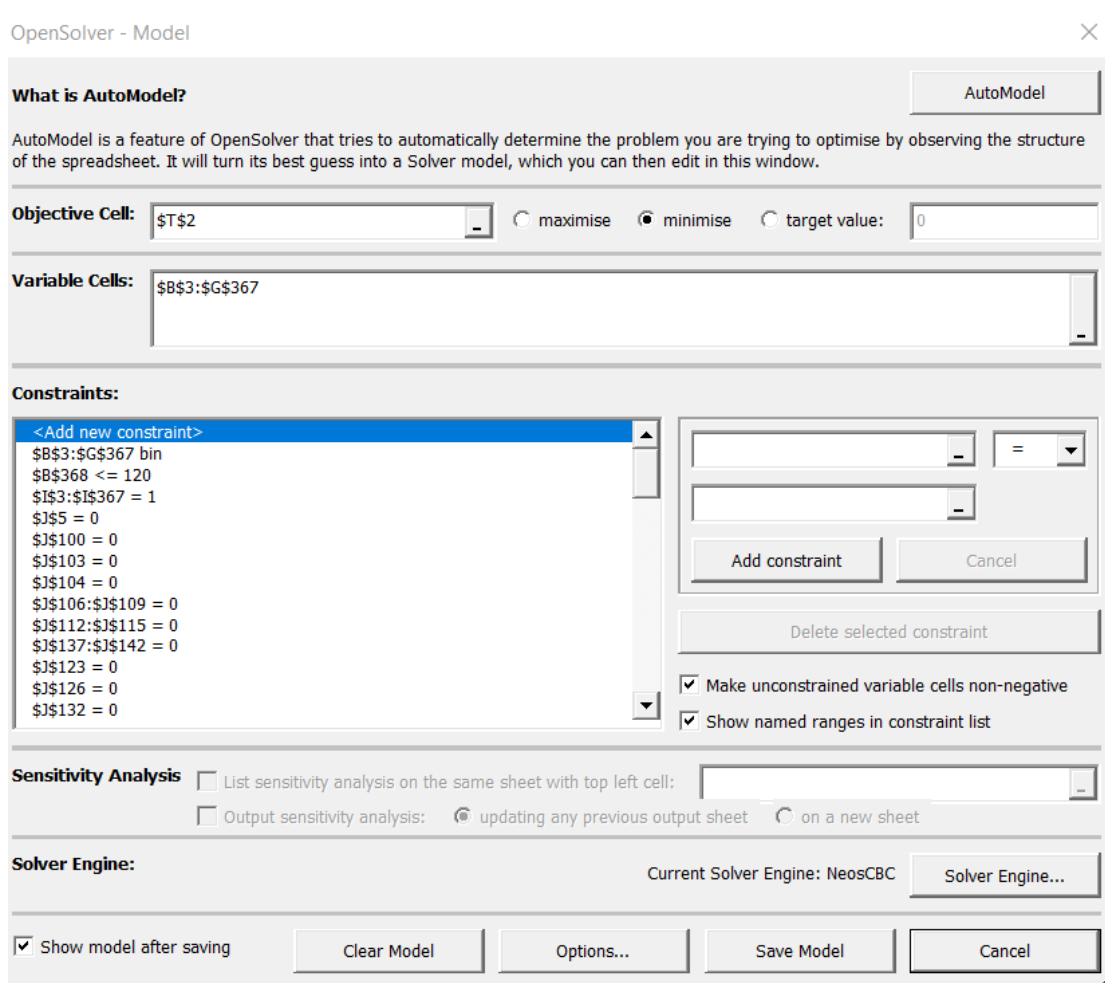
4.3 Μεθοδολογία επίλυσης μαθηματικού μοντέλου με χρήση Excel- Open Solver

Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης και την κατανομή των λεωφορείων στα αμαξοστάσια είναι το Open Solver του λογισμικού Microsoft Excel. Είναι βασισμένο στη γλώσσα προγραμματισμού C++ και σχεδιασμένο για την επίλυση μεγάλων γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης και προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού. Ο αριθμός των δεδομένων που εισάγονται στο πρόβλημα μπορεί να είναι μεγάλος, αφού δεν υπάρχουν τεχνητοί περιορισμοί στην εφαρμογή του συγκεκριμένου εργαλείου. Η προσθήκη του εργαλείου φαίνεται στο παρακάτω εικονίδιο:



Σχήμα 4.4 Open Solver στο Excel

Η επίλυση θα επέλθει αφού πρώτα οριστεί το κελί της αντικειμενικής συνάρτησης καθώς και τα κελιά που αντιπροσωπεύουν τις μεταβλητές απόφασης. Το βασικό πλαίσιο διαλόγου του εργαλείου παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 4.5 Το πλαίσιο διαλόγου του Open Solver για το πρόβλημα της κατανομής λεωφορείων

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης στο πρόβλημα πραγματοποιήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

Objective cell: Εισάγεται το κελί που αντιστοιχεί στην αντικειμενική συνάρτηση του οποίου στη συγκεκριμένη περίπτωση επιζητούμε ελαχιστοποίηση, το κελί αυτό είναι το T2 και αποτελεί ένα SUMPRODUCT των κελιών που αντιπροσωπεύει το y_{lj} . Στην πράξη για να αποφευχθεί συνωστισμός πράξεων σε ένα κελί λόγω του μεγέθους της αντικειμενικής συνάρτησης, επιλέχθηκε να διασπαστεί σε επιμέρους SUMPRODUCTS, των οποίων το άθροισμα οδήγησε στην τελική μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Δίπλα από το objective cell επιλέγεται το είδος της αριστοποίησης ανάλογα με το επιθυμητό αποτέλεσμα (μεγιστοποίηση, ελαχιστοποίηση και ορισμός

συγκεκριμένης τιμής). Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία ελαχιστοποιείται η αντικειμενική συνάρτηση και για το λόγο αυτό ενεργοποιείται η επιλογή Minimise.

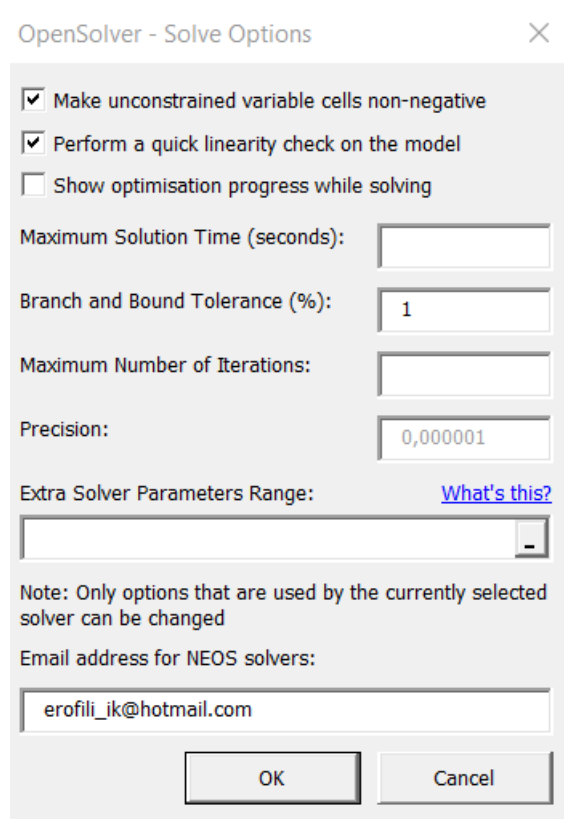
Variable cells: Εισάγονται τα κελιά που αντιστοιχούν στις μεταβλητές απόφασης. Αυτό είναι το y_{lj} , και παίρνει ακέραιες τιμές 0 ή 1, αντιπροσωπεύοντας αντίστοιχα το αμαξοστάσιο στο οποίο κατανέμεται κάθε λεωφορείο κάθε λεωφορειακής γραμμής.

Constraints: Εισάγονται οι περιορισμοί του προβλήματος. Πατώντας το κουμπί Add εμφανίζεται ο διάλογος εισαγωγής περιορισμών, με τη βοήθεια του οποίου δημιουργούνται οι περιορισμοί του προβλήματος.



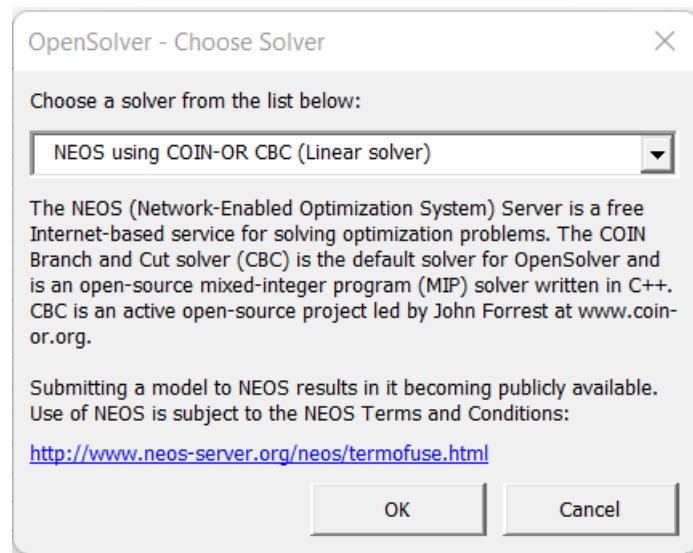
Σχήμα 4.6 Το πλαίσιο διαλόγου εισαγωγής περιορισμών

Options: Με το κουμπί αυτό εμφανίζεται ένα πλαίσιο διαλόγου μέσω του οποίου ορίζονται οι παράμετροι επίλυσης. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα δεν αγνοούνται οι ακέραιοι περιορισμοί, διότι το πρόβλημα αναφέρεται σε ακέραιες μεταβλητές.



Σχήμα 4.7 Το πλαίσιο διαλόγου των παραμέτρων του Excel Solver

Μετά την εισαγωγή των απαραίτητων πληροφοριών, αρχικά επιλέγεται το Save Model ώστε να σωθούν τα δεδομένα αυτά, και στη συνέχεια επιλέγεται το Solve. Με την χρήση του Open Solver επιλύθηκε το πρόβλημα εφαρμόζοντας μία επαναληπτική μαθηματική διαδικασία, ώστε τα κελιά του γβj να παίρνουν τις βέλτιστες τιμές βάση της ελαχιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης.



Σχήμα 4.8 Επιλογή επιλυτή solver

5 ΣΕΝΑΡΙΑ

5.1 Εισαγωγή

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης καταμερισμού λεωφορείων στα αμαξοστάσια ώστε να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση του κόστους νεκρών χιλιομέτρων και ισοκατανομής λεωφορείων στα αμαξοστάσια, διαμορφώθηκαν τέσσερα σενάρια επίλυσης. Παρακάτω παρουσιάζονται τα σενάρια αυτά πιο αναλυτικά.

5.2 Παρουσίαση σεναρίων

Προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα στο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στο open solver έγιναν τέσσερα διαφορετικά σενάρια για την βέλτιστη κατανομή των λεωφορείων στα υπάρχοντα αμαξοστάσια. Τα σενάρια αυτά προκύπτουν λόγω περιορισμού δυνατότητας υποστήριξης όλων των τύπων λεωφορείων από τα αμαξοστάσια. Επίσης γίνεται παραδοχή ισοκατανομής λεωφορείων στα αμαξοστάσια αυτά. Πιο συγκεκριμένα τα ηλεκτρικά λεωφορεία δεν είναι δυνατόν να εξυπηρετηθούν από όλα τα αμαξοστάσια καθώς προϋποθέτει ειδικές εγκαταστάσεις φόρτισης και συντήρησής τους. Στον πίνακα 5.1 φαίνονται περιγραφικά όλα τα σενάρια που έγιναν στη παρούσα διπλωματική εργασία. Για τα λεωφορεία κατανάλωσης φυσικού αερίου καθώς και για τα αρθρωτά λεωφορεία υπάρχουν περιορισμοί εξυπηρέτησης αμαξοστασίων οι οποίοι θα παραμείνουν σταθεροί και για τα τέσσερα σενάρια. Οι περιορισμοί αυτοί είναι:

- Τα λεωφορεία φυσικού αερίου εξυπηρετούνται μόνο από τα αμαξοστάσια των Άνω Λιουσίων και Ανθούσας.
- Τα αρθρωτά λεωφορεία εξυπηρετούνται μόνο από τα αμαξοστάσια Πέτρου Ράλλη και Ανθούσας.

Έχοντας διαμορφώσει την αντικειμενική συνάρτηση στο κεφάλαιο 4, παρατηρούνται δύο συντελεστές βαρύτητας k_1 και k_2 , οι οποίοι παίρνουν τις τιμές

0 ή 1 προκειμένου να φανεί εάν λαμβάνεται στο κάθε σενάριο υπόψιν το κόστος ισοκατανομής ή όχι.

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η εξής:

$$\min Z = k_1 * \sum h_{ly} * C_{\ell} + k_2 * \sum \left(\frac{\sum y_{lj} * a_{tj} * N_j}{C_s} - I \right)^2 \quad (1)$$

Σε ό,τι αναφορά στο κόστος των διανυθέντων νεκρών χιλιομέτρων (πρώτο μέλος της συνάρτησης) αναμένεται να είναι αισθητά μεγαλύτερο από το κόστος ισοκατανομής λεωφορείων στα αμαξοστάσια (δεύτερο μέλος της συνάρτησης), πράγμα που αποδεικνύεται και παρακάτω στα αποτελέσματα. Επίσης ο συντελεστής k_1 (συντελεστής κόστους νεκρών χιλιομέτρων) αναμένεται να είναι πάντα 1, καθώς αποτελεί το βασικό όρο της αντικειμενικής συνάρτησης για τον βέλτιστο καταμερισμό των λεωφορείων στα αμαξοστάσια. Τέλος, αναφορικά με το συντελεστή ισοκατανομής λεωφορείων k_2 αναμένεται να πάρει τη τιμή 0 ή 1, ανάλογα με το πιθανό σενάριο που εξετάζεται κάθε φορά.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται όλα τα σενάρια που έγιναν στη παρούσα διπλωματική εργασία.

Πίνακας 5.1 Εναλλακτικά σενάρια καταμερισμού λεωφορείων στα αμαξοστάσια.

Σενάριο	Εξυπηρέτηση ηλεκτρικών	Συντελεστής k_1	Συντελεστής k_2
1 ^ο	Όλα τα αμαξοστάσια	1	0
2 ^ο	Μόνο Άγιος-Ιωάννης Ρεντη και Βοτανικός	1	0
3 ^ο	Όλα τα αμαξοστάσια	1	1
4 ^ο	Μόνο Άγιος-Ιωάννης Ρεντη και Βοτανικός	1	1

Στο **πρώτο σενάριο** που εφαρμόστηκε αφορά τη δυνατότητα εξυπηρέτησης ηλεκτρικών λεωφορείων από όλα τα αμαξοστάσια. Αυτό το σενάριο προϋποθέτει πως όλα τα αμαξοστάσια διαθέτουν τις απαραίτητες εγκαταστάσεις υποστήριξης ηλεκτρικών λεωφορείων, καθώς και των υπολοίπων λεωφορείων, καλύπτοντας πάντα τους περιορισμούς εξυπηρέτησης των αρθρωτών και φυσικού αερίου λεωφορείων. Ακόμα στο σενάριο αυτό δεν λαμβάνεται υπόψη το κόστος ισοκατανομής λεωφορείων στα αμαξοστάσια και άρα ο συντελεστής k_2 παίρνει την τιμή 0.

Στο **δεύτερο σενάριο** γίνεται η παραδοχή πως τα ηλεκτρικά λεωφορεία μπορούν να εξυπηρετηθούν μόνο από τα αμαξοστάσια του Βοτανικού και του Αγίου Ιωάννη-Ρέντη. Αυτό σημαίνει πως μόνο αυτά τα αμαξοστάσια διαθέτουν τις απαραίτητες εγκαταστάσεις υποστήριξης ηλεκτρικών λεωφορείων, καθώς επίσης και άλλων ειδών. Ομοίως με πριν, οι βασικοί περιορισμοί εξυπηρέτησης των αρθρωτών λεωφορείων και φυσικού αερίου παραμένουν σταθεροί. Ακόμα στο σενάριο αυτό δεν λαμβάνεται υπόψη το κόστος ισοκατανομής λεωφορείων στα αμαξοστάσια και άρα ο συντελεστής k_2 παίρνει πάλι την τιμή 0.

Στο **τρίτο σενάριο** που μελετήθηκε τα ηλεκτρικά λεωφορεία εξυπηρετούνται από όλα τα αμαξοστάσια. Και αυτό το σενάριο προϋποθέτει πως όλα τα αμαξοστάσια διαθέτουν τις απαραίτητες εγκαταστάσεις υποστήριξης ηλεκτρικών λεωφορείων, καθώς και των υπολοίπων λεωφορείων, καλύπτοντας πάντα τους περιορισμούς εξυπηρέτησης των αρθρωτών και φυσικού αερίου λεωφορείων. Τέλος στο σενάριο αυτό λαμβάνεται υπόψη το κόστος ισοκατανομής λεωφορείων στα αμαξοστάσια και άρα ο συντελεστής k_2 παίρνει την τιμή 1.

Στο **τέταρτο** και τελευταίο **σενάριο** γίνεται η παραδοχή πως τα ηλεκτρικά λεωφορεία μπορούν να εξυπηρετηθούν μόνο από τα αμαξοστάσια του Βοτανικού και του Αγίου Ιωάννη-Ρέντη. Αυτό σημαίνει πως μόνο αυτά τα αμαξοστάσια διαθέτουν τις απαραίτητες εγκαταστάσεις υποστήριξης ηλεκτρικών λεωφορείων, καθώς επίσης και άλλων ειδών. Ομοίως με πριν οι βασικοί περιορισμοί εξυπηρέτησης των αρθρωτών λεωφορείων και φυσικού αερίου παραμένουν σταθεροί. Τέλος και στο σενάριο αυτό λαμβάνεται υπόψη το κόστος ισοκατανομής λεωφορείων στα αμαξοστάσια και άρα ο συντελεστής k_2 παίρνει πάλι την τιμή 1.

Συνοπτικά στα τέσσερα σενάρια που έγιναν για την ανεύρεση της βέλτιστης λύσης καταμερισμού λεωφορείων στα αμαξοστάσια από το λογισμικό, εισάγονται οι περιορισμοί της αντικειμενικής συνάρτησης. Άρα το βέλτιστο αποτέλεσμα προκύπτει από την ελαχιστοποίηση του κόστους της αντικειμενικής συνάρτησης από τα σενάρια αυτά, εισάγοντας τους περιορισμούς ακεραιότητας, μέγιστης χωρητικότητας και υποστήριξης αμαξοστασίων.

5.3 Αποτελέσματα επίλυσης εναλλακτικών σεναρίων

Κατά την αναζήτηση της βέλτιστης λύσης καταμερισμού των λεωφορείων στα αμαξοστάσια, το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε (Excel-Open Solver) δίνει το βέλτιστο αποτέλεσμα ελαχιστοποίησης κόστους της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε εναλλακτικό σενάριο που έχει διαμορφωθεί. Στο παρακάτω πίνακα 5.2 φαίνονται τα αποτελέσματα κόστους (σε €) που έδωσε το λογισμικό για το βέλτιστο καταμερισμό των λεωφορείων στα αμαξοστάσια για κάθε διαφορετικό σενάριο.

Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα ελαχιστοποίησης κόστους για όλα τα σενάρια

Σενάριο	Αποτελέσματα αντικειμενικής συνάρτησης (€)
1 ^ο	46.795.930,68
2 ^ο	46.889.087,42
3 ^ο	46.796.492,55
4 ^ο	46.889.649,62

Παρατηρώντας το κόστος καταμερισμού λεωφορείων στα αμαξοστάσια, ο πρώτος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης που εκφράζει το κόστος των νεκρών χιλιομέτρων που διανύονται από τα λεωφορεία είναι πολύ μεγαλύτερος σε σχέση με το κόστος ισοκατανομής (σύγκριση 1^{ου} και 3^{ου} σεναρίου, 2^{ου} και 4^{ου} σεναρίου). Επομένως, ο δεύτερος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης, ο οποίος εισάγει το κόστος ισοκατανομής λεωφορείων στα αμαξοστάσια, δε συμβάλλει σημαντικά στο συνολικό κόστος, παρά μόνο μία αύξηση της τάξης του 0,001%. Παρόλα αυτά αυξάνει το κόστος, όπως ήταν αναμενόμενο.

Αναλύοντας τα αποτελέσματα και συγκρίνοντας 1^ο και 2^ο σενάριο, καθώς και 3^ο με 4^ο, παρατηρείται πως όταν εισάγεται ο περιορισμός εξυπηρέτησης αμαξοστασίων αυξάνεται το κόστος καταμερισμού κατά 0,002% και στις δύο περιπτώσεις. Αξίζει να σημειωθεί πως στα σενάρια όπου όλα τα αμαξοστάσια μπορούν να εξυπηρετήσουν ηλεκτρικά λεωφορεία, δεν συμπεριλαμβάνεται κάποιο κόστος ειδικών εγκαταστάσεων. Στη περίπτωση που λαμβάνονταν υπόψη το επιπλέον κόστος εγκαταστάσεων που απαιτείται για την υποστήριξη ηλεκτρικών λεωφορείων, τότε το αποτέλεσμα θα ήταν σίγουρα διαφορετικό.

Παράλληλα με τα αποτελέσματα σχετικά με το κόστος καταμερισμού λεωφορείων στα αμαξοστάσια, υπολογίζεται και το ποσοστό πληρότητας των αμαξοστασίων για κάθε πιθανό σενάριο. Στο παρακάτω πίνακα 5.3 παρουσιάζεται το ποσοστό πληρότητας κάθε αμαξοστασίου του δικτύου της Αττικής.

Πίνακας 5.3 Ποσοστό πληρότητας κάθε αμαξοστασίου για τα σενάρια που εξετάζονται.

	Σενάριο 1 ^ο	Σενάριο 2 ^ο	Σενάριο 3 ^ο	Σενάριο 4 ^ο
Άγιος Δημήτριος	97,67%	98,5%	97,67%	98,5%
Άγιος Ιωάννης-Ρέντης	42,33%	42,33%	39%	42,33%
Βοτανικός	49,88%	50,47%	49,88%	50,47%
Πέτρου Ράλλη	30,99%	30,72%	30,99%	30,72%
Ανθούσα	89,93%	89,19%	94,37%	89,19%
Άνω Λιόσια	99,92%	99,92%	99,92%	99,92%

Οι πιο μεγάλες διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται είναι η μείωση του ποσοστού πληρότητας του αμαξοστασίου του Αγίου Ιωάννη-Ρέντη (1^ο και 3^ο σενάριο) κατά 3,33% καθώς και η αύξηση της πληρότητας του αμαξοστασίου της Ανθούσας (1^ο και 3^ο σενάριο) κατά 4,44% έπειτα από τη προσθήκη του όρου της ισοκατανομής στην αντικειμενική συνάρτηση, αλλά χωρίς περιορισμό εξυπηρέτηση ηλεκτρικών λεωφορείων.

Μετά τον περιορισμό εξυπηρέτησης ηλεκτρικών λεωφορείων από τα αμαξοστάσια του Βοτανικού και του Αγίου Ιωάννη-Ρέντη παρατηρείται μία μικρή αύξηση της τάξης του 0,83% στο αμαξοστάσιο του Αγίου Δημητρίου και 0,59% στο αμαξοστάσιο του Βοτανικού. Ακόμα παρατηρείται μία μικρή μείωση πληρότητας στο αμαξοστάσιο της Πέτρου Ράλλη κατά 0,27% και της Ανθούσας κατά 0,64%.

Σύμφωνα με τον πίνακα τα ποσοστά πληρότητας δεν διαφοροποιούνται αισθητά για τα τέσσερα σενάρια, ούτε κατά το περιορισμό εξυπηρέτησης ηλεκτρικών λεωφορείων αλλά ούτε και με τη παραδοχή κόστους ισοκατανομής. Συνεπώς παρότι ο δεύτερο όρος της αντικειμενικής συνάρτησης, που είναι ο όρος της

ισοκατανομής, αυξάνεται όσο η πληρότητα κάποιου αμαξοστασίου αποκλίνει από την ιδανική, δεν διαφοροποιεί τα ποσοστά πληρότητας στα έξι αμαξοστάσια.

Από τη σύγκριση των ποσοστών πληρότητας των αμαξοστασίων παρατηρείται πως η επίλυση επιτυγχάνει καλύτερη εξισορρόπηση της πληρότητας. Η κατανομή αυτή βοηθάει στη καλύτερη λειτουργία των αμαξοστασίων, αποφεύγοντας τη πιθανότητα κάποιο να υπολειτουργεί, με αποτέλεσμα να μην επιβαρύνεται επιπλέον σε οικονομικό επίπεδο ο φορέας.

5.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα τα οποία εξάγονται από τη διαδικασία βέλτιστου καταμερισμού λεωφορείων στα αμαξοστάσια, με τη βοήθεια του λογισμικού Excel-Open Solver, διαφοροποιούνται ανάλογα με το σενάριο στο οποίο επιδιώκεται η εύρεση της βέλτιστης λύσης.

Τα συμπεράσματα που βγαίνουν από την επίλυση του μοντέλου είναι πως κατά την εισαγωγή ενός ακόμη όρου στην αντικειμενική συνάρτηση (του κόστους ισοκατανομής) το κόστος καταμερισμού αυξάνεται, όπως ήταν αναμενόμενο, ελάχιστα. Η μικρή αυτή αύξηση συνεισφέρει ελάχιστα στο συνολικό κόστος ισοκατανομής. Παρόλα αυτά το μεγαλύτερο ποσοστό του κόστους καταμερισμού προκύπτει από τα διανυθέντα «νεκρά» χιλιόμετρα που διανύει κάθε λεωφορείο από και προς το αμαξοστάσιο στην αρχή και στο τέλος της βάρδιάς του. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα του καταμερισμού με και χωρίς την εισαγωγή περιορισμού υποστήριξης ηλεκτρικών λεωφορείων. Με τον περιορισμό ότι τα ηλεκτρικά λεωφορεία εξυπηρετούνται μόνο από τα αμαξοστάσια του Βοτανικού και του Αγίου Ιωάννη-Ρέντη (σενάριο 1^ο και 2^ο, 3^ο και 4^ο αντίστοιχα) παρατηρείται αύξηση του κόστους καταμερισμού, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα πως ο περιορισμός υποστήριξης συμβάλει στην αύξηση τους κόστους καταμερισμού λεωφορείων σε αμαξοστάσια.

Χρήσιμα συμπεράσματα εξάγονται επίσης όταν λαμβάνεται υπόψη η διαφοροποίηση των ποσοστών πληρότητας των αμαξοστασίων στα τέσσερα σενάρια. Παρατηρώντας τα ποσοστά πληρότητας στο αμαξοστάσιο του Αγίου Δημητρίου, το οποίο είναι πολύ υψηλό (97% και 98,5%), συμπεραίνεται ότι αυτό συμβαίνει λόγω μικρής δυναμικότητας του αμαξοστασίου (λίγων θέσεων στάθμευσης λεωφορείων, 120) σε σύνηθες μέγεθος λεωφορείων σε σχέση με τα υπόλοιπα. Επίσης τα αμαξοστάσια Ανθούσας και Άνω Λιοσίων εμφανίζουν υψηλά

ποσοστά πλήρωσης διότι είναι τα μόνα αμαξοστάσια που μπορούν να εξυπηρετήσουν λεωφορεία που κινούνται με τη χρήση συμπιεσμένου φυσικού αερίου (CNG). Τέλος τα αμαξοστάσια του Πέτρου Ράλλη, Βοτανικού και Αγίου Ιωάννη Ρέντη εμφανίζουν μειωμένα ποσοστά πλήρωσης λόγω αυξημένης δυναμικότητας. Συμπερασματικά οι μεταβολές στα ποσοστά πληρότητας δηλώνουν ότι ο καταμερισμός λεωφορείων λόγω του τύπου τους μεταβάλλει στο συνολικό κόστος καταμερισμού λεωφορείων στα αμαξοστάσια.

5.5 Ανάλυση ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας ή ανάλυση μεταβελτιστοποίησης είναι η μελέτη των αλλαγών στις παραμέτρους προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού και εξετάζει τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζεται η τελική βέλτιστη λύση από την μεταβολή των συντελεστών της αντικειμενικής συνάρτησης. Η ανάλυση ευαισθησίας παρέχει σημαντικές πληροφορίες, αφού οι παράμετροι που μελετώνται, αναφέρονται σε οικονομικά μεγέθη, όπως οι τιμές καυσίμου κατανάλωσης κ.α..

5.5.1 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η μεταβολή των τιμών κόστους καυσίμου κατανάλωσης των λεωφορείων (πετρέλαιο, ηλεκτρισμός, φυσικό αέριο) και την επίδραση που θα έχει η μεταβολή αυτή στο συνολικό κόστος καταμερισμού λεωφορείων σε αμαξοστάσια. Γίνονται οι εξής παραδοχές μεταβολής τιμών:

1. Αύξηση τιμής ηλεκτρικού ρεύματος κατά 10%.
2. Μείωση τιμής ηλεκτρικού ρεύματος κατά 10%.
3. Αύξηση τιμής φυσικού αερίου κατά 10%.
4. Μείωση τιμής φυσικού αερίου κατά 10%.
5. Αύξηση τιμής πετρελαίου κατά 10%.
6. Μείωση τιμής πετρελαίου κατά 10%.
7. Αύξηση όλων των τιμών μαζί κατά 10%.
8. Μείωση όλων των τιμών μαζί κατά 10%.

Οι παραπάνω μεταβολές μελετώνται για κάθε ένα από τα τέσσερα σενάρια ξεχωριστά και τα αποτελέσματά τους φαίνονται στους παρακάτω πίνακες. Στη τελευταία στήλη των πινάκων παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή του κόστους, από το αρχικό σενάριο (1^ο, 2^ο, 3^ο, 4^ο) μετά τις μεταβολές στις τιμές καυσίμων.

Πίνακας 5.4 Μεταβολή τιμών καυσίμου για το 1^ο σενάριο

	Κόστος καταμερισμού (€)	Ποσοστιαία μεταβολή σε σχέση με το αρχικό σενάριο (%)
Αρχικό σενάριο	46.795.913	-
Αύξηση ηλεκτρικού ρεύματος κατά 10%	47.687.011	+1,9%
Μείωση ηλεκτρικού ρεύματος κατά 10%	45.904.850	-1,9%
Αύξηση φυσικού αερίου κατά 10%	47.463.573	+1,4%
Μείωση φυσικού αερίου κατά 10%	46.128.288	-1,4%
Αύξηση πετρελαίου κατά 10%	49.916.801	+7,1%
Μείωση πετρελαίου κατά 10%	43.675.061	-7,1%
Αύξηση όλων των τιμών κατά 10%	51.475.524	+10%
Μείωση όλων των τιμών κατά 10%	42.116.338	-9,9%

Πίνακας 5.5 Μεταβολή τιμών καυσίμου για το 2^ο σενάριο

	Κόστος καταμερισμού (€)	Ποσοστιαία μεταβολή σε σχέση με το αρχικό σενάριο (%)
Αρχικό σενάριο	46.889.087	-
Αύξηση ηλεκτρικού ρεύματος κατά 10%	47.489.974	+1,3%
Μείωση ηλεκτρικού ρεύματος κατά 10%	45.988.200	-1,3%
Αύξηση φυσικού αερίου κατά 10%	47.556.730	+1,4%
Μείωση φυσικού αερίου κατά 10%	46.221.445	-1,4%
Αύξηση πετρελαίου κατά 10%	50.009.467	+6,7%
Μείωση πετρελαίου κατά 10%	43.768.708	-6,7%
Αύξηση όλων των τιμών κατά 10%	51.577.996	+10%
Μείωση όλων των τιμών κατά 10%	42.200.179	-9,9%

Πίνακας 5.6 Μεταβολή τιμών καυσίμου για το 3^ο σενάριο

	Κόστος καταμερισμού (€)	Ποσοστιαία μεταβολή σε σχέση με το αρχικό σενάριο (%)
Αρχικό σενάριο	46.796.493	-
Αύξηση ηλεκτρικού ρεύματος κατά 10%	47.687.573	+1,9%
Μείωση ηλεκτρικού ρεύματος κατά 10%	45.905.413	-1,9%
Αύξηση φυσικού αερίου κατά 10%	47.464.136	+1,4%

Μείωση φυσικού αερίου κατά 10%	46.128.850	-1,4%
Αύξηση πετρελαίου κατά 10%	49.917.363	+6,7%
Μείωση πετρελαίου κατά 10%	43.675.623	-6,7%
Αύξηση όλων των τιμών κατά 10%	51.476.086	+9,9%
Μείωση όλων των τιμών κατά 10%	42.116.900	-9,9%

Πίνακας 5.7 Μεταβολή τιμών καυσίμου για το 4^ο σενάριο

	Κόστος καταμερισμού (€)	Ποσοστιαία μεταβολή σε σχέση με το αρχικό σενάριο (%)
Αρχικό σενάριο	46.889.650	-
Αύξηση ηλεκτρικού ρεύματος κατά 10%	47.790.537	+1,9%
Μείωση ηλεκτρικού ρεύματος κατά 10%	45.988.763	-1,9%
Αύξηση φυσικού αερίου κατά 10%	47.557.292	+1,4%
Μείωση φυσικού αερίου κατά 10%	46.222.007	-1,4%
Αύξηση πετρελαίου κατά 10%	50.010.029	+6,7%
Μείωση πετρελαίου κατά 10%	43.769.270	-6,7%
Αύξηση όλων των τιμών κατά 10%	51.578.558	+9,9%
Μείωση όλων των τιμών κατά 10%	42.200.741	-9,9%

5.5.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων ανάλυσης ευαισθησίας

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας των τιμών καυσίμου των αστικών λεωφορείων. Τη μικρότερη ποσοστιαία μεταβολή (είτε αύξησης είτε μείωσης) την εμφανίζουν οι μεταβολές τιμής του φυσικού αερίου ($\pm 1,4\%$) σε όλα τα σενάρια. Την αμέσως επόμενη μεταβολή οι μεταβολές του ηλεκτρικού ρεύματος ($\pm 1,3$ και $\pm 1,9\%$) και την μεγαλύτερη οι μεταβολές του πετρελαίου κίνησης ($\pm 6,7$ και $\pm 7,1\%$). Τέλος παρατηρείται, όπως ήταν αναμενόμενο, μεγάλη αύξηση του κόστους καταμερισμού των λεωφορείων στα αμαξοστάσια στη περίπτωση αύξησης κατά 10% όλων των τιμών καυσίμων, και μεγάλη μείωση κόστους κατά τη μείωση όλων των τιμών καυσίμων κατά 10% αντίστοιχα ($\pm 9,9$ και $\pm 10\%$).

Από τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα περισσότερα οχήματα του φορέα είναι πετρελαιοκίνητα και για αυτό και η μεταβολή της τιμής του πετρελαίου κίνησης επηρεάζει τόσο πολύ την τελική τιμή κόστους καταμερισμού. Μία πιθανή λύση μείωσης του κόστους είναι να αντικατασταθούν τα πετρελαιοκίνητα λεωφορεία με ηλεκτρικά και φυσικού αερίου, δεδομένου ότι οι μεταβολές των τιμών δεν επηρεάζουν τόσο πολύ την τελική τιμή κόστους.

Δεδομένου ότι η οικονομική κατάσταση ολοένα και δυσχεραίνει, ο φορέας οφείλει να είναι προετοιμασμένος για πιθανές μεταβολές στις τιμές κόστους καυσίμων. Προκειμένου να διατηρήσει τη τρέχουσα κατάσταση εξυπηρέτησης του επιβατικού κοινού και πιθανώς να τη βελτιώσει, θα πρέπει να λάβει υπόψη τις μεταβολές αυτές για το μελλοντικό σχεδιασμό των αστικών λεωφορειακών γραμμών.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

6.1 Συμπεράσματα

Για την επίτευξη του βέλτιστου καταμερισμού των λεωφορείων του Ο.Α.Σ.Α. στα αμαξοστάσια της Αττικής, έγινε αναζήτηση λύσης με τη χρήση γραμμικού προγραμματισμού και του λογισμικού Excel Open Solver. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η εύρεση βέλτιστης λύσης, διαμορφώθηκαν τέσσερα διαφορετικά σενάρια ώστε να προκύψουν συμπεράσματα τόσο για το συνολικό κόστος καταμερισμού όσο και για τα ποσοστά πληρότητας των αμαξοστασίων του λεωφορειακού δικτύου.

Συνοπτικά τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τη παρούσα διπλωματική εργασία είναι:

- Το μαθηματικό πρότυπο του γραμμικού προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα εργασία για την εύρεση της βέλτιστης κατανομής λεωφορείων σε αμαξοστάσια συμβάλλει στη μείωση κόστους των «νεκρών» χιλιομέτρων που διανύουν τα λεωφορεία και αποτελεί βασικό παράγοντα κόστους του φορέα.
- Έπειτα από την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου συμπεραίνεται ότι το κόστος καταμερισμού αυξάνεται με τη προσθήκη κάθε όρου της αντικειμενικής συνάρτησης. Ωστόσο το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού κόστους επηρεάζεται από τα διανυθέντα «νεκρά» χιλιόμετρα από τα λεωφορεία.
- Το κόστος ισοκατανομής που εισάγεται στην αντικειμενική συνάρτηση συνεισφέρει ελάχιστα στην αντικειμενική συνάρτηση, αυξάνοντας μόνο κατά 0,001% το συνολικό κόστος ισοκατανομής. Αυτό συμβαίνει λόγω των πολλών περιορισμών που τίθενται στο μοντέλο και εξαναγκάζει τα λεωφορεία να κατανεμηθούν σε συγκεκριμένα αμαξοστάσια.
- Στα σενάρια όπου δεν συμπεριλαμβάνεται ο περιορισμός υποστήριξης ηλεκτρικών λεωφορείων από συγκεκριμένα αμαξοστάσια το συνολικό κόστος είναι μειωμένο κατά 0,002% σε σχέση με το κόστος που προκύπτει από τα σενάρια με περιορισμό υποστήριξης.
- Σχετικά με τα ποσοστά πληρότητας των αμαξοστασίων, αυξημένα παρατηρούνται της Ανθούσας και των Άνω Λιοσίων και στα τέσσερα σενάρια που γίνονται. Το γεγονός αυτό εξηγείται λόγω του ότι τα αμαξοστάσια αυτά είναι τα μόνα που υποστηρίζουν λεωφορεία που καταναλώνουν φυσικό αέριο.

- Επίσης αυξημένο ποσοστό πληρότητας έχει και αυτό του Αγίου Δημητρίου λόγω μειωμένης δυναμικότητας εξυπηρέτησης λεωφορείων. Η λειτουργία αμαξοστασίων με υψηλό ποσοστό πληρότητας είναι πιθανό να συνεπάγεται δυσκολίες στο συντονισμό των λεωφορείων κατά τη στάθμευσή τους.
- Τα αμαξοστάσια της Πέτρου Ράλλη, του Βοτανικού και του Αγίου Ιωάννη Ρέντη παρουσιάζουν μειωμένα ποσοστά πληρότητας λόγω αυξημένης δυναμικότητας σε χωρητικότητα λεωφορείων.
- Έπειτα από το περιορισμό εξυπηρέτησης ηλεκτρικών λεωφορείων μόνο στα αμαξοστάσια του Βοτανικού και του Αγίου Ιωάννη Ρέντη παρατηρείται αύξηση του ποσοστού πληρότητάς τους, όπως ήταν αναμενόμενο, καθώς είναι τα μόνα που τα εξυπηρετούν. Το αμαξοστάσιο του Βοτανικού, που βρίσκεται στο κέντρο της Αθήνας έχει υψηλότερο ποσοστό πληρότητας καθώς οι αφετηρίες και τα τέρματα στο κέντρο της πόλης πληθαίνουν. Δεδομένης της μεγάλης ζήτησης στις περιοχές με πολλές αφετηρίες και τέρματα απαιτείται χωροταξικός ανορθολογισμός από τον Ο.Α.Σ.Α..
- Κατά την ανάλυση ευαισθησίας των τιμών καυσίμων κίνησης συμπεραίνεται ότι η μεγαλύτερη μεταβολή προκύπτει κατά την αύξηση/μείωση της τιμής του πετρελαίου κίνησης. Αυτό συνεπάγεται μεγάλη επίπτωση στην τελική τιμή κόστους ισοκατανομής και άρα ο φορέας θα μπορούσε να επεξεργαστεί το ενδεχόμενο αντικατάστασης πετρελαιοκίνητων λεωφορείων με ηλεκτρικά και φυσικού αερίου.

6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στη παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μία προσπάθεια κατανομής λεωφορείων σε αμαξοστάσια του Ο.Α.Σ.Α. λαμβάνοντας υπόψη τα διανυθέντα «νεκρά» χιλιόμετρα που διανύει κάθε λεωφορείο. Επίσης λήφθηκε υπόψη ο συνολικός αριθμός των λεωφορείων του Ο.Α.Σ.Α. που πρόκειται να αγοραστούν τα οποία συμπεριλαμβάνουν και νέα ηλεκτρικά οχήματα, ώστε να μειωθεί το κόστος του φορέα. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτό του μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού και η λύση βρέθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Excel Open Solver. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση προτείνονται κάποια θέματα για περαιτέρω έρευνα.

Συνολικά, ενώ η κατανομή από λεωφορείο σε αμαξοστάσια έχει ιδιαίτερη σημασία για τους αντίστοιχους φορείς, οι έρευνες για αυτό το θέμα είναι σχετικά περιορισμένες με λίγες μόνο δημοσιεύσεις την τελευταία δεκαετία. Ως εκ τούτου, υπάρχει περιθώριο περαιτέρω βελτίωσης. Πιο συγκεκριμένα για μελλοντικές έρευνες:

1. Θα μπορούσαν να επικεντρωθούν στην εισαγωγή πιο ρεαλιστικών συναρτήσεων κόστους κατανομής, περιορισμών τοποθεσίας αμαξοστασίων και παραμέτρων και περιορισμών που σχετίζονται με τους εργαζόμενους, και το λειτουργικό κόστος των αμαξοστασίων, προς την ανάπτυξη πιο περίπλοκων μοντέλων.
2. Ο συνδυασμός σχεδιασμού γραμμής και κατανομής από λεωφορείο σε αμαξοστάσιο θα μπορούσε να είναι μέρος του συνολικού προβλήματος σχεδιασμού του δικτύου διαμετακόμισης και όχι μελέτη που να προκύπτει μετά τη κατασκευή των αμαξοστασίων.
3. Κρίνεται απαραίτητη η μελέτη στην οποία να περιλαμβάνονται τα λειτουργικά κόστη των αμαξοστασίων για τη κατασκευή και συντήρησή τους στη περίπτωση που αυτά εξυπηρετούν ηλεκτρικά λεωφορεία. Επίσης το κόστος φόρτισης όχι μόνο στα αμαξοστάσια αλλά και στους ενδιάμεσους σταθμούς. Σίγουρα αν ληφθεί υπόψη το κόστος αυτό η επιρροή του στο τελικό κόστος του φορέα θα είναι μεγάλη.
4. Στη παρούσα διπλωματική εργασία έγιναν δυο παραδοχές σχετικά με την εξυπηρέτηση ηλεκτρικών λεωφορείων. Στη μία περίπτωση όλα τα αμαξοστάσια μπορούν να εξυπηρετήσουν ηλεκτρικά λεωφορεία και στη δεύτερη περίπτωση μόνο αυτά του Βοτανικού και Αγίου Ιωάννη Ρέντη. Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε μία μελέτη στην οποία να γίνεται αναλυτική περιγραφή των εγκαταστάσεων που απαιτούνται για την εξυπηρέτηση και συντήρηση ηλεκτρικών λεωφορείων και να συμπεριλαμβάνονται υπόψη στη τελική εξίσωση.
5. Ένας ακόμα παράγοντας που δεν λήφθηκε υπόψη στη παρούσα διπλωματική εργασία είναι αυτός του επιβατικού φορτίου του κάθε οχήματος και πως αυτό επηρεάζει τη κατανάλωση καυσίμου και συνεπώς το τελικό συνολικό κόστος του φορέα.
6. Μεγάλο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε μία μελέτη στην οποία να λαμβάνονται υπόψη στα ηλεκτρικά λεωφορεία το είδος της μπαταρίας που έχει το κάθε ένα ώστε να φανεί κατά πόσο το κάθε είδος μπαταρίας επηρεάζει το τελικό συνολικό κόστος.
7. Τέλος θα μπορούσε να γίνει μία μελέτη στην οποία να λαμβάνονται υπόψη οι μεταβολές στο κόστος καταμερισμού από την ανάλυση ευαισθησίας τιμών καυσίμου, και να μελετηθεί ένα μοντέλο στο οποίο τα περισσότερα λεωφορεία θα είναι ηλεκτρικά και φυσικού αερίου.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής Βιβλιογραφία

Carl H. Häll, Avishai (Avi) Ceder, Joakim Ekström & Nils-Hassan Quttineh (2018), Adjustments of public transit operations planning process for the use of electric buses, Journal of Intelligent Transportation Systems Technology, Planning, and Operations.

Antti Lajunen, Journal of Cleaner Production (2017), Lifecycle costs and charging requirements of electric buses with different charging Methods.

Alexander Kunith, Roman Mendelevitch & Dietmar Goehlich (2017), Electrification of a city bus network – An optimization model for cost-effective placing of charging infrastructure and battery sizing of fast charging electric bus systems, International Journal of Sustainable Transportation.

Shuimiao He, Yuanqing Wang and Zihe Zhang, Syracuse University Library (2019), Optimization of Bus Depot Location with Consideration of Dead Kilometers: A Case, Study in Xi'an, China.

Fatima Al Ali and Noha M. Hassan (2017), Optimization of Bus Depot Location with Consideration of Maintenance Center Availability, American Society of Civil Engineers.

Jagadish Mahadikar, Raviraj H. Mulangi and Thallak G. Sitharam (2015), Optimization of bus allocation to depots by minimizing dead kilometers, Department of Civil Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, India.

Suresh Chavhan, Deepak Gupta , Chandana B. N. , Ramesh Kumar Chidambaram, Ashish Khanna, and Joel J. P. C. Rodrigues (2020), A Novel Emergent Intelligence Technique for Public Transport Vehicle Allocation Problem in a Dynamic Transportation System, University of Wollongong.

Gaetano Fusco, Adriano Alessandrini, Chiara Colombaroni, Maria Pia Valentini (2012), A model for transit design with choice of electric charging system, SIDT Scientific Seminar.

Eleftheria Kontou, Konstantinos Kepaptsoglou, Aristotelis E. Charalampakis, Matthew G. Karlaftis (2013), The bus to depot allocation problem revisited: a genetic algorithm.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Κώστογλου Β. (2015), Επιχειρησιακή Έρευνα , Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη

