

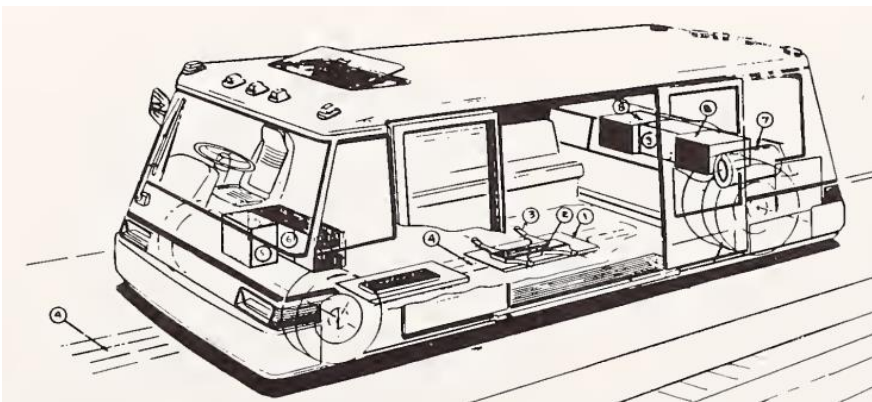


**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΜΠ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Ανάπτυξη Μοντέλου Βελτιστοποίησης της Κατανομής  
Πόρων για τη Διαχείριση Λεωφορείων Αστικών  
Συγκοινωνιών**



**ΛΑΪΟΣ ΗΛΙΑΣ**

Επίβλεψη:

**Γιώργος Γιαννής, Καθηγητής ΕΜΠ**

**Κωνσταντίνος Κεπαπτσόγλου, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ**

Αθήνα, Μάρτιος 2018



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με τη Διπλωματική Εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Θα ήθελα λοιπόν, με την αφορμή αυτή, να ευχαριστήσω όλους εκείνους που στάθηκαν δίπλα μου, σε ολόκληρη τη φοιτητική μου πορεία.

Καταρχήν ευχαριστώ θερμά τον κ. Γ. Γιαννή, Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ και τον κ. Κ. Κεραπτσόγλου Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών για την ανάθεση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Η πραγματοποίηση και η ολοκλήρωση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας δεν θα είχε επιτευχθεί χωρίς την πολύτιμη υποστήριξη και καθοδήγησή τους σε όλα τα στάδια εκπόνησής της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου που με στηρίζουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο σε κάθε στιγμή της ζωής μου, χωρίς τους οποίους τίποτα από όσα έχω καταφέρει μέχρι σήμερα δε θα ήταν πραγματικότητα.

*Λάιος Ηλίας*



## Ανάπτυξη Μοντέλου Βελτιστοποίησης της Κατανομής Πόρων για τη Διαχείριση Λεωφορείων Αστικών Συγκοινωνιών

Ηλίας Λάιος

Επιβλέποντες Καθηγητές:

Γιώργος Γιαννής, Καθηγητής ΕΜΠ

Κωνσταντίνος Κεπαπτσόγλου, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

### ΣΥΝΟΨΗ

**Στόχος** της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η επίτευξη της βέλτιστης κατανομής των χρηματικών πόρων του Οργανισμού Αστικών Συγκοινωνιών Αθήνας με απώτερο επιθυμητό αποτέλεσμα την αποτελεσματικότερη αντικατάσταση του στόλου των λεωφορείων. Για την πραγματοποίηση του στόχου αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης το οποίο στηρίζεται στις αρχές του γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού. Το μοντέλο αυτό, εκφράστηκε μέσω αντικειμενικής συνάρτησης στην οποία εισάγονται οι συντελεστές που επηρεάζουν την κάθε ενέργεια (χρήση, πώληση, αγορά) που απαιτείται για την αποδοτικότερη λειτουργία του οργανισμού. Κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης που περιλαμβάνει το συνολικό κόστος της αγοράς, λειτουργίας, πώλησης λεωφορείων. Για τη βελτιστοποίηση αυτή λήφθηκαν υπόψη σημαντικοί περιορισμοί όπως είναι ο διατιθέμενος προϋπολογισμός για την αγορά νέων λεωφορείων κάθε έτος, το όριο των οχημάτων που μπορεί και πρέπει να διαχειριστεί ο Ο.Α.Σ.Α., τα χιλιόμετρα που πρέπει να διανύονται κάθε έτος για την κάλυψη των αναγκών του δικτύου και περιορισμοί σχετικά με την ορθή χρήση και λειτουργία του στόλου λεωφορείων κατά τη διάρκεια του πλάνου των 20 ετών που επιλέχθηκε να για την ανάλυση. Η μεγαλύτερη μείωση του κόστους διαχείρισης στόλου λεωφορείων προκύπτει από τις ευνοϊκές συνθήκες αγοράς καινοτόμων και πιο αποδοτικών τύπων λεωφορείων, όπως τα ηλεκτροκίνητα και του συμπιεσμένου φυσικού αερίου.

Λέξεις κλειδιά: κατανομή πόρων, διαχείριση λεωφορείων, χρήση λεωφορείων, γραμμικός ακέραιος προγραμματισμός

**Development of an Optimization Model of Resource Allocation  
for the Management of Urban Transport Buses**

Ilias Laios

Supervisors:

George Yannis, Professor, NTUA

Konstantinos Kapaptoglou, Assistant Professor, NTUA

**ABSTRACT**

The aim of this Diploma Thesis is to estimate the optimal allocation of the financial resources of the Athens Urban Transport Organization aiming for the most desirable result of the more efficient replacement of bus fleet. A mathematical optimization model based on the principles of linear integer programming was developed and implemented to achieve the goal. This model was expressed through an objective function that introduces the factors affecting each action (use, sale, purchase) required for a more efficient operation of the Organization. The optimization process seeks to minimize the objective function that includes the total cost of buying, operating and selling buses. This optimization has taken into account significant constraints such as the budget available for the purchase of new buses each year, the limit of the vehicles that Athens Urban Transport Organization can and should manage, the mileage to be spent each year for meeting the passenger traffic demand and restrictions on the proper use and operation of the bus fleet during the 20-year plan which is chosen for the analysis. The greatest reduction in the cost of bus fleet management results from favorable conditions for the purchase of innovative and more efficient types of buses, such as electric buses and compressed natural gas buses.

Keywords: resource allocation, bus management, bus use, linear integer programming

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η **ανάπτυξη ενός μοντέλου βελτιστοποίησης με στόχο τη βέλτιστη κατανομή των πόρων για την αποτελεσματική λειτουργία του στόλου λεωφορείων τον οποίο διαχειρίζεται ο Ο.Α.Σ.Α.** που αποτελείται από διάφορους τύπους οχημάτων. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε η ανάπτυξη ενός προγράμματος χρήσης, αγοράς και πώλησης των λεωφορείων με χρονικό ορίζοντα είκοσι ετών και με βασικό περιορισμό τη διάθεση των ελάχιστων πόρων. Οι τέσσερις βασικές κατηγορίες οχημάτων που εξετάστηκαν είναι : 1) πετρελαιοκίνητα, 2) υβριδικά, 3) φυσικού αερίου, 4) ηλεκτροκίνητα.

**Η συλλογή των στοιχείων** επιτεύχθηκε μέσω εκτενούς βιβλιογραφικής ανασκόπησης ερευνών και μεθοδολογιών συναφών με το αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Η συλλογή των απαραίτητων στοιχείων για τον κάθε τύπο λεωφορείου επιτεύχθηκε μέσω του Οργανισμού Αστικών Συγκοινωνιών Αθηνών (Ο.Α.Σ.Α.) και παρόμοιων εταιρειών διαχείρισης στόλου λεωφορείων στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής που αναφέρονται παρακάτω. Τα στοιχεία οργανώθηκαν και ομαδοποιήθηκαν κατάλληλα και προέκυψαν οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν ως **παράμετροι** του μοντέλου βελτιστοποίησης.

Ακολούθως αναπτύχθηκε η **αντικειμενική συνάρτηση** του μοντέλου βελτιστοποίησης, η οποία ελαχιστοποιείται με γραμμικό ακέραιο προγραμματισμό μέσω του βοηθήματος του Excel (Excel OpenSolver). Αναπτύχθηκαν **17 σενάρια βελτιστοποίησης** για μεταβολές στα κόστη αγοράς νέων λεωφορείων, κόστη καυσίμων, διατιθέμενου προϋπολογισμού και εισαγωγής προστίμου για την εκπομπή καυσαερίων. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

| Μοντέλα<br>βελτιστοποίησης                             | Τελικό Κόστος   | Λεωφορεία που<br>χρησιμοποιούνται |          |            |               | Λεωφορεία που<br>πωλούνται |          |            |               | Λεωφορεία που<br>αγοράζονται |          |            |               | μ.ο. ηλικίας<br>λεωφορείων που<br>χρησιμοποιούνται |          |            |               |
|--|-----------------|-----------------------------------|----------|------------|---------------|----------------------------|----------|------------|---------------|------------------------------|----------|------------|---------------|--|----------|------------|---------------|
|  |                 | πετρελαϊκή                        | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαϊκή                 | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαϊκή                   | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαϊκή   | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα |
| 1. ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ                                      | 1.006.657.050 € | 276                               | 275      | 1183       | 627           | 600                        | 375      | 660        | 376           | 151                          | 0        | 793        | 417           | 6,4  | 10,2     | 7,0        | 7,8           |
| 2. Χαμηλό Κόστος<br>Αγοράς<br>Πετρελαιοκίνητων         | 1.002.843.197 € | 660                               | 275      | 516        | 994           | 670                        | 375      | 450        | 639           | 574                          | 0        | 126        | 784           | 3,9  | 10,6     | 8,5        | 7,7           |
| 3. Υψηλό Κόστος<br>Αγοράς<br>Πετρελαιοκίνητων          | 992.165.137 €   | 100                               | 300      | 1477       | 485           | 600                        | 375      | 731        | 306           | 0                            | 0        | 1087       | 275           | 10,3   | 9,8      | 6,8        | 7,9           |
| 4. Χαμηλό Κόστος<br>Αγοράς Υβριδικών                   | 969.529.060 €   | 80                                | 1710     | 360        | 210           | 600                        | 735      | 450        | 225           | 0                            | 1360     | 0          | 0             | 10,0   | 6,9      | 9,3        | 9,7           |
| 5. Υψηλό Κόστος<br>Αγοράς Υβριδικών                    | 995.032.079 €   | 335                               | 240      | 1125       | 651           | 600                        | 375      | 626        | 400           | 175                          | 0        | 735        | 441           | 6,7  | 10,6     | 7,1        | 7,8           |
| 6. Χαμηλό Κόστος<br>Αγοράς<br>Λεωφορείων<br>Φυσ.Αερίου | 901.977.478 €   | 40                                | 275      | 1920       | 195           | 600                        | 375      | 950        | 225           | 0                            | 0        | 1500       | 0             | 1,0  | 10,5     | 6,9        | 10,2          |
| 7. Υψηλό Κόστος<br>Αγοράς<br>Λεωφορείων<br>Φυσ.Αερίου  | 1.002.544.152 € | 620                               | 285      | 360        | 1165          | 675                        | 375      | 450        | 580           | 475                          | 0        | 0          | 955           | 5,0  | 10,2     | 10,2       | 7,4           |
| 8. Χαμηλό Κόστος<br>Αγοράς<br>Ηλεκτροκίνητων           | 836.810.091 €   | 40                                | 185      | 300        | 1825          | 600                        | 375      | 450        | 840           | 0                            | 0        | 0          | 1615          | 1,0  | 10,6     | 10,4       | 6,5           |
| 9. Υψηλό Κόστος<br>Αγοράς<br>Ηλεκτροκίνητων            | 1.002.526.047 € | 160                               | 270      | 1728       | 180           | 600                        | 375      | 788        | 225           | 0                            | 0        | 1338       | 0             | 10,3   | 9,8      | 6,9        | 10,2          |
| 10. Χαμηλό Κόστος<br>Πετρελαίου                        | 936.869.655 €   | 796                               | 999      | 270        | 180           | 815                        | 405      | 450        | 225           | 521                          | 724      | 0          | 0             | 6,4  | 7,6      | 10,2       | 9,5           |
| 11. Υψηλό Κόστος<br>Πετρελαίου                         | 1.021.361.078 € | 40                                | 175      | 1319       | 806           | 600                        | 375      | 680        | 490           | 0                            | 0        | 899        | 596           | 1,0  | 10,6     | 6,4        | 7,7           |
| 12. Χαμηλό Κόστος<br>Φυσ.Αερίου                        | 888.116.767 €   | 40                                | 275      | 1920       | 195           | 600                        | 375      | 950        | 225           | 0                            | 0        | 1500       | 0             | 1,0  | 10,6     | 6,8        | 10,2          |
| 13. Υψηλό Κόστος<br>Φυσ.Αερίου                         | 1.028.050.994 € | 620                               | 300      | 340        | 1165          | 670                        | 375      | 450        | 580           | 470                          | 0        | 0          | 955           | 5,1  | 10,2     | 10,2       | 7,4           |
| 14. Χαμηλό Κόστος<br>Ηλεκτρισμού                       | 966.341.356 €   | 344                               | 300      | 622        | 1149          | 600                        | 375      | 566        | 579           | 299                          | 0        | 232        | 939           | 2,8  | 10,2     | 7,6        | 7,5           |
| 15. Υψηλό Κόστος<br>Ηλεκτρισμού                        | 1.013.174.212 € | 160                               | 255      | 1715       | 195           | 600                        | 375      | 775        | 225           | 0                            | 0        | 1325       | 0             | 10,3   | 10,1     | 6,9        | 9,6           |
| 16. Επιβολή<br>προστίμου για<br>εκπομπή<br>καυσαερίων  | 1.065.241.958 € | 205                               | 275      | 695        | 1185          | 600                        | 375      | 565        | 585           | 165                          | 0        | 335        | 975           | 2,1  | 10,1     | 6,9        | 7,4           |
| 17.<br>Προϋπολογισμός<br>40.000.000                    | 1.020.465.780 € | 354                               | 275      | 1175       | 551           | 600                        | 375      | 520        | 572           | 285                          | 0        | 785        | 347           | 3,8  | 10,4     | 7,0        | 8,0           |

Σχήμα 1: Συγκεντρωτική εικόνα αποτελεσμάτων



Με βάση τα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας προέκυψαν μια σειρά από χρήσιμα συμπεράσματα:

- Η **αύξηση του κόστους αγοράς** του εκάστοτε τύπου λεωφορείων έχει ως αποτέλεσμα τη **μείωση της χρήσης** του συγκεκριμένου τύπου. Περισσότερο από την αύξηση του κόστους αγοράς τους κατά 30% επηρεάζονται τα πετρελαιοκίνητα, τα φυσικού αερίου και τα ηλεκτροκίνητα, για τα οποία υπάρχει μείωση κατά 70% στην κάθε περίπτωση. Αντίστοιχα, η **μείωση του κόστους αγοράς** του εκάστοτε τύπου λεωφορείων έχει ως αποτέλεσμα την **αύξηση των λεωφορείων** του συγκεκριμένου τύπου που **χρησιμοποιούνται**. Σημαντικότερη, σε ενδεχόμενη μείωση του κόστους αγοράς τους κατά 30%, είναι η αύξηση των υβριδικών κατά 522% και των πετρελαιοκινήτων κατά 139%.
- Η **αύξηση του κόστους** του κάθε **καυσίμου** επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την "απόφαση" του μοντέλου για **μειωμένη χρήση** των λεωφορείων που χρησιμοποιούν το συγκεκριμένο καύσιμο. Σημαντικότερη μείωση έχουν τα πετρελαιοκίνητα κατά 90%, τα ηλεκτροκίνητα και φυσικού αερίου κατά 70%. Ομοίως, η **μείωση του κόστους** του κάθε **καυσίμου** οδηγεί σε **αύξηση των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται** και λειτουργούν με το συγκεκριμένο καύσιμο. Περισσότερο επηρεάζονται τα πετρελαιοκίνητα και τα υβριδικά καθώς αυξάνονται κατά 188% και 263% αντίστοιχα, σε περίπτωση που το κόστος του πετρελαίου μειωθεί κατά 30%.
- Στο 100% των μοντέλων βελτιστοποίησης που επιλύθηκαν για **αύξηση του κόστους αγοράς** του εκάστοτε τύπου λεωφορείων ή **αύξηση του κόστους καυσίμου** που χρησιμοποιούν έχει ως αποτέλεσμα τη **μηδενική αγορά** του συγκεκριμένου τύπου. Αντίθετα, η **μείωση του κόστους αγοράς** του εκάστοτε τύπου λεωφορείων ή του καυσίμου που χρησιμοποιούν έχει ως αποτέλεσμα την **αύξηση των λεωφορείων** του συγκεκριμένου τύπου που **αγοράζονται**. Σημαντικότερη, σε ενδεχόμενη μείωση του κόστους αγοράς τους κατά 30% ή του πετρελαίου κατά 30%, είναι η αύξηση των υβριδικών που αγοράζονται κατά 1360 και 724 περισσότερα οχήματα αντίστοιχα.
- Σε όλες τις περιπτώσεις που **ευνοείται η αγορά κάποιου τύπου λεωφορείων**, είτε με τη μείωση του αρχικού κόστους αγοράς τους είτε με τη μείωση του κόστους καυσίμου που χρησιμοποιούν, οδηγεί σε **μικρή αύξηση του ποσοστού των πωλήσεων** του συγκεκριμένου τύπου. Αυτή η ενέργεια δικαιολογείται καθώς είναι προτιμότερη η συνεχόμενη αγορά νέων λεωφορείων από τη συνεχόμενη χρήση τους.
- Η μικρή ηλικία των λεωφορείων αποτελεί σημαντικό κομμάτι της διοίκησης του Ο.Α.Σ.Α. για τη δημιουργία φιλικότερης εικόνας προς τον χρήστη αλλά και για τον ίδιο τον οργανισμό. Η **μείωση του κόστους αγοράς** του εκάστοτε τύπου λεωφορείων έχει

ως αποτέλεσμα τη **μείωση του μέσου όρου ηλικίας** των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται του συγκεκριμένου τύπου. Αιτία του παραπάνω είναι η συνεχόμενη ανανέωση των λεωφορείων με την αγορά καινούργιων. Περισσότερο από την αύξηση του κόστους αγοράς τους κατά 30% επηρεάζονται τα πετρελαιοκίνητα και τα λεωφορεία φυσικού αερίου, για τα οποία υπάρχει μείωση του μέσου όρου ηλικίας τους κατά 40% και 30% αντίστοιχα. Αντίθετα, η **αύξηση του κόστους αγοράς** του εκάστοτε τύπου λεωφορείων έχει ως αποτέλεσμα την **αύξηση του μέσου όρου ηλικίας** του συγκεκριμένου τύπου που **χρησιμοποιούνται**. Αυτό συμβαίνει διότι αποφεύγεται η αγορά νέων λεωφορείων με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται εκείνα που βρίσκονται στον αρχικό στόλο για αρκετά χρόνια μέχρι τη στιγμή της πώλησής τους. Σημαντικότερη, σε ενδεχόμενη αύξηση του κόστους αγοράς τους κατά 30%, είναι η αύξηση του μέσου όρου ηλικίας κατά 622% των πετρελαιοκίνητων.

- Η **μείωση στον προϋπολογισμό** που διατίθεται στον Ο.Α.Σ.Α. για αγορές επηρεάζει ελάχιστα όχι μόνο τα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται αλλά και το τελικό κόστος για τη διαχείριση του στόλου. Πραγματοποιείται **μικρή αύξηση των πετρελαιοκίνητων που αγοράζονται**, τα οποία αποτελούν το φθηνότερο τύπο λεωφορείων, καθώς μειώνεται η αγορά των ακριβότερων ηλεκτροκίνητων.
- Ενδεχόμενη **επιβολή προστίμου για την εκπομπή καυσαερίων** διοξειδίου του άνθρακα από τα οχήματα επιφέρει σημαντική **μείωση στα ρυπογόνα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται** (πετρελαιοκίνητα και φυσικού αερίου) και στο μέσο όρο ηλικίας όσων χρησιμοποιούνται. Ενώ, παράλληλα **αυξάνεται το τελικό κόστος διαχείρισης** του στόλου λεωφορείων καθώς ακόμα χρησιμοποιούνται λεωφορεία που εκπέμπουν ρύπους, αλλά με την προσαύξηση του προστίμου.
- Το **τελικό κόστος** για τη διαχείριση του στόλου λεωφορείων **μειώνεται** σημαντικά στις περιπτώσεις που **ευνοείται η αγορά συγκεκριμένου τύπου λεωφορείων**. Αυτό εξηγείται καθώς γίνεται χρήση κυρίως των λεωφορείων που αγοράζονται αρκετά φθηνά, με συνέπεια να προκύπτει μικρό τελικό κόστος αγοράς. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα μείωσης του κόστους αγοράς των ηλεκτροκίνητων, τα οποία αποτελούν το 80% του στόλου) κατά 30% που οδηγεί σε μείωση κατά 17% του τελικού κόστους διαχείρισης. Αντίθετα, το **τελικό κόστος μεταβάλλεται ελάχιστα**, είτε αυξητικά είτε μειωτικά, όταν **αυξάνεται το κόστος αγοράς** ενός τύπου λεωφορείου ή του καυσίμου που χρησιμοποιεί. Αυτό συμβαίνει διότι παρά το γεγονός ότι δεν ευνοείται η αγορά ενός τύπου λεωφορείων, μπορούν τα καλυφθούν οι ανάγκες του Ο.Α.Σ.Α. από τους υπόλοιπους τύπους λεωφορείων.
- Τα **υβριδικά λεωφορεία** σημειώνουν σημαντικά θετικές μεταβολές μόνο στις περιπτώσεις που ευνοείται η αγορά τους. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι μειονέκτημα των υβριδικών αποτελεί το αρχικό κόστος αγοράς τους και πλεονεκτούν στα υπόλοιπα χαρακτηριστικά που αφορούν στο κόστος λειτουργίας και συντήρησης,

ενώ δεν επηρεάζονται από τις μεταβολές στα κόστη που αφορούν τους υπόλοιπους τύπους λεωφορείων.

- Οι μεταβολές των τιμών που δείχνουν να αφορούν έναν συγκεκριμένο τύπο οχημάτων (π.χ. η μείωση του κόστους ηλεκτρισμού αφορά τα ηλεκτροκίνητα) επηρεάζουν άμεσα και τις ενέργειες που γίνονται για τους υπόλοιπους τύπους οχημάτων. Αυτό συμβαίνει καθώς υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των χρονικών στιγμών και των ενεργειών που πρέπει να πραγματοποιηθούν για την αποτελεσματικότερη και οικονομικότερη λειτουργία του στόλου λεωφορείων που διαχειρίζεται Ο.Α.Σ.Α.

- Μεγαλύτερη **σταθερότητα** στο σύνολο των μεταβολών στα κόστη όλων των τύπων λεωφορείων δείχνουν τα **υβριδικά**, ενώ στο σύνολο των μοντέλων που επιλύθηκαν για διαφορετικά κόστη αγορών και καυσίμων τα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται είναι 43% φυσικού αερίου, 28% ηλεκτροκίνητα, 17% υβριδικά και 12% πετρελαιοκίνητα.

### **Πίνακας Περιεχομένων**

|        |    |
|--------|----|
| 1..... | 21 |
|--------|----|

|  |           |
|--|-----------|
| Εισαγωγή.....  | 21        |
| 1.1 Γενική ανασκόπηση.....   | 21        |
| 1.1.1 Η ελληνική πραγματικότητα .....  | 22        |
| 1.2 Στόχος Διπλωματικής Εργασίας .....   | 23        |
| 1.3 Μεθοδολογία.....   | 23        |
| <b>Σχήμα 1.1:</b> Διάγραμμα των σταδίων εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας ..                         | 24        |
| 1.4 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας .....   | 24        |
| 2.....   | 26        |
| <b>Βιβλιογραφική Επισκόπηση .....</b>  | <b>26</b> |
| 2.1 Γενικά.....  | 26        |
| 2.2 Εφαρμογές Βελτιστοποίησης - Συναφείς Έρευνες.....  | 27        |
| 2.2.1 Μελέτες συσχέτισης κόστους λειτουργίας και συντήρησης με ηλικία λεωφορείων                       | 27        |
| 2.2.2 Μελέτες σχετικές με την προληπτική συντήρηση .....   | 27        |
| 2.2.3 Μελέτες σχετικές με αντικατάσταση, ανακατασκευή, αποκατάσταση λεωφορείων .....                   | 27        |
| 2.2.4 Μελέτες συσχέτισης χρήσης λεωφορείων με την ηλικία τους.....                                     | 28        |
| 2.2.5 Μελέτες συσχέτισης κόστους λεωφορείων με κατανάλωση καυσίμου .....                               | 30        |
| 2.2.6 Μελέτες σύγκρισης παράλληλης αντικατάστασης με σειράς .....                                      | 31        |
| 2.2.7 Οικονομική ανάλυση μοντέλου και ανάλυση κόστους-οφέλους (Η ανάλυση αποδοτικότητας κόστους) ..... | 31        |
| 2.2.8 Μελέτες σχετικές με τη βέλτιστη πολιτική διαχείρισης στόλου λεωφορείων .....                     | 32        |
| 2.2.9 Μελέτες σύγκρισης ομοιογενών και ετερογενών μοντέλων βελτιστοποίησης.....                        | 35        |
| 2.3 Κριτική αξιολόγηση.....  | 37        |
| 3.....   | 39        |
| <b>Θεωρητικό υπόβαθρο βελτιστοποίησης.....</b>   | <b>39</b> |
| 3.1 Γενικά.....  | 39        |
| 3.2 Γραμμικός Προγραμματισμός .....  | 39        |
| 3.2.1 Εισαγωγή.....  | 39        |
| 3.2.2 Τι είναι ο Γραμμικός Προγραμματισμός.....  | 40        |
| 3.2.3 Μαθηματικό μοντέλο Γραμμικού Προγραμματισμού .....   | 41        |
| <b>Πίνακας 3.2.1:</b> Σύγκριση των δύο μορφών Γραμμικού Προγραμματισμού .....                          | 42        |
| 3.2.4 Προϋποθέσεις Γραμμικού Προγραμματισμού .....   | 42        |
| 3.2.5 Είδη λύσεων Γραμμικού Προγραμματισμού .....  | 44        |
| 3.3 Η μέθοδος Simplex .....  | 45        |
| 3.4 Επίλυση προβλημάτων Γραμμικού Προγραμματισμού με τη βοήθεια υπολογιστικών πακέτων .....            | 47        |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 3.5     | Ακέραιος Προγραμματισμός .....   | 48 |
| 3.6     | Δυαδικός Ακέραιος Προγραμματισμός .....                                      | 49 |
| 3.7     | Ο αλγόριθμος του Excel Solver για Ακέραιο Προγραμματισμό .....               | 49 |
| 3.7.1   | Αλγόριθμοι τυφλής αναζήτησης .....   | 49 |
|         | <b>Πίνακας 3.2:</b> Είδη αλγορίθμων τυφλής αναζήτησης .....                  | 50 |
| 3.7.2   | Αλγόριθμοι Επέκτασης και Οριοθέτησης .....                                   | 50 |
| 3.8     | Επιλογή του Μοντέλου της Διπλωματικής Εργασίας.....                          | 51 |
| 4.....  | .....  | 53 |
|         | Στατιστικά δεδομένα-Ανάπτυξη μοντέλου βελτιστοποίησης .....                  | 53 |
| 4.1     | Γενικά.....  | 53 |
| 4.2     | Εισαγωγικά στοιχεία για τα λεωφορεία .....                                   | 53 |
| 4.2.1   | Ο ρόλος των αστικών συγκοινωνιών και ειδικότερα των λεωφορείων .....         | 54 |
| 4.2.2   | Τεχνολογίες κινητήρων λεωφορείων .....                                       | 55 |
|         | <b>Φωτογραφία 1:</b> Πετρελαιοκίνητο λεωφορείο .....                         | 56 |
|         | <b>Φωτογραφία 2:</b> Ηλεκτροκίνητο λεωφορείο ή τρόλεϊ.....                   | 57 |
|         | <b>Φωτογραφία 3:</b> Λεωφορείο φυσικού αερίου .....                          | 57 |
|         | <b>Φωτογραφία 5:</b> Υβριδικό λεωφορείο .....                                | 58 |
|         | <b>Πίνακας 4.1:</b> Σύγκριση κινητήρων υβριδικής τεχνολογίας .....           | 59 |
| 4.2.2   | Κρίσιμοι παράγοντες για τη διαχείριση στόλου λεωφορείων.....                 | 59 |
| 4.2.2.1 | Ηλικία λεωφορείων και διανυθέντα χιλιόμετρα.....                             | 60 |
| 4.2.2.2 | Δαπάνες συντήρησης μηχανικών εξαρτημάτων.....                                | 60 |
| 4.2.2.3 | Τοπογραφία και ταχύτητα κίνησης λεωφορείων.....                              | 60 |
| 4.2.2.4 | Οικονομικοί παράγοντες .....   | 61 |
| 4.2.2.5 | Τιμές καυσίμων και κοινωνικό κόστος εκπομπής καυσαερίων .....                | 61 |
| 4.2.2.6 | Αποδοτικότητα κινητήρα .....   | 61 |
| 4.3     | Συλλογή δεδομένων .....  | 62 |
|         | <b>Σχήμα 4.1:</b> Τιμές κόστους λειτουργίας πετρελαιοκίνητων .....           | 63 |
|         | <b>Σχήμα 4.2:</b> Τιμές κόστους λειτουργίας λεωφορείων φυσικού αερίου .....  | 63 |
|         | <b>Σχήμα 4.3:</b> Τιμές κόστους λειτουργίας ηλεκτροκίνητων λεωφορείων .....  | 64 |
|         | <b>Σχήμα 4.4:</b> Τιμές κόστους λειτουργίας υβριδικών λεωφορείων.....        | 64 |
|         | <b>Σχήμα 4.5:</b> Τιμές κόστους συντήρησης λεωφορείων φυσικού αερίου .....   | 65 |
|         | <b>Σχήμα 4.7:</b> Τιμές κόστους συντήρησης υβριδικών λεωφορείων .....        | 65 |
|         | <b>Σχήμα 4.8:</b> Τιμές κόστους συντήρησης πετρελαιοκίνητων λεωφορείων ..... | 66 |
|         | <b>Πίνακας 4.2:</b> Συγκεντρωτικός πίνακας μέσου όρου δεδομένων.....         | 66 |
| 4.4     | Συμπεράσματα στατιστικών στοιχείων.....                                      | 67 |

|   |    |
|---|----|
| 4.5 Περιγραφή προγραμματιστικού μοντέλου βελτιστοποίησης.....   | 68 |
| 4.5.1 Γενικά .....  | 68 |
| 4.5.2 Μαθηματικό μοντέλο .....  | 68 |
| 4.6 Περιγραφή Παραμέτρων, Περιορισμών και Υποθέσεων του μοντέλου.....   | 70 |
| 4.6.1. Συντελεστές που εισάγονται στην Αντικειμενική Συνάρτηση.....   | 70 |
| 4.6.2 Περιορισμοί.....  | 72 |
| 5.....  | 78 |
| Εφαρμογή Μεθοδολογίας-Αποτελέσματα .....  | 78 |
| 5.1    Εισαγωγή .....   | 78 |
| 5.2    Προγραμματιστική Εφαρμογή Μοντέλου Βελτιστοποίησης μέσω Excel – Open Solver  | 79 |
| <b>Σχήμα 5.1:</b> Προσθήκη Open Solver στο Microsoft Excel .....  | 79 |
| <b>Σχήμα 5.2:</b> Το πλαίσιο διαλόγου του Open Solver για το πρόβλημα της κατανομής πόρων .....   | 80 |
| <b>Σχήμα 5.3:</b> Το πλαίσιο διαλόγου εισαγωγής περιορισμών .....   | 81 |
| <b>Σχήμα 5.4:</b> Το πλαίσιο διαλόγου των παραμέτρων του Excel Solver .....   | 81 |
| <b>Σχήμα 5.5:</b> Εικόνα εισαγωγής αντικειμενικής συνάρτησης και περιορισμών στο συγκεκριμένο πρόβλημα.....                             | 83 |
| <b>Σχήμα 5.6:</b> Η τελική μορφή του φύλλου εργασίας με τη βέλτιστη λύση του προβλήματος κατανομής πόρων .....                          | 84 |
| <b>Σχήμα 5.7:</b> Απόσπασμα τελικής μορφής εργασίας με τα αποτελέσματα των χρησιμοποιούμενων λεωφορείων τύπου 1 (πετρελαιοκίνητα) ..... | 84 |
| 5.4 Αποτελέσματα του μοντέλου βελτιστοποίησης.....  | 84 |
| 5.4.1 Αποτελέσματα βασικού σεναρίου.....  | 85 |
| <b>Πίνακας 5.1 :</b> Σύνολο πετρελαιοκίνητων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου.....                   | 86 |
| <b>Πίνακας 5.2 :</b> Σύνολο πετρελαιοκίνητων λεωφορείων που πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου .....                         | 87 |
| <b>Πίνακας 5.3 :</b> Σύνολο πετρελαιοκίνητων λεωφορείων που αγοράζονται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου .....                       | 87 |
| <b>Πίνακας 5.4:</b> Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βασικού σεναρίου .....   | 88 |
| <b>Πίνακας 5.5:</b> Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου ...  | 88 |
| <b>Σχήμα 5.8:</b> Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου.....                   | 88 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Σχήμα 5.9:</b> Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου.....  | 89 |
| 5.4.2 Αποτελέσματα για χαμηλό κόστος αγοράς πετρελαιοκίνητων λεωφορείων .....  | 90 |
| <b>Πίνακας 5.6:</b> Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου χαμηλού κόστους αγοράς πετρελαιοκίνητων .....  | 91 |
| <b>Σχήμα 5.10:</b> Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος αγοράς πετρελαιοκίνητων .....  | 91 |
| <b>Σχήμα 5.11:</b> Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος αγοράς πετρελαιοκίνητων..... | 92 |
| 5.4.3 Αποτελέσματα για υψηλό κόστος αγοράς πετρελαιοκίνητων λεωφορείων.....  | 93 |
| <b>Πίνακας 5.7:</b> Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου υψηλού κόστους αγοράς πετρελαιοκίνητων .....   | 93 |
| <b>Πίνακας 5.8:</b> Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου ...   | 94 |
| <b>Σχήμα 5.12:</b> Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος αγοράς πετρελαιοκίνητων .....   | 94 |
| <b>Σχήμα 5.13:</b> Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος αγοράς πετρελαιοκίνητων ..... | 94 |
| 5.4.4 Αποτελέσματα για χαμηλό κόστος αγοράς υβριδικών λεωφορείων.....  | 96 |
| <b>Πίνακας 5.9:</b> Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου χαμηλού κόστους αγοράς υβριδικών .....   | 96 |
| <b>Πίνακας 5.10:</b> Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος αγοράς υβριδικών λεωφορείων .....  | 96 |
| <b>Σχήμα 5.14:</b> Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος αγοράς υβριδικών λεωφορείων.....   | 97 |
| <b>Σχήμα 5.15:</b> Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος αγοράς υβριδικών .....       | 97 |
| 5.4.5 Αποτελέσματα για υψηλό κόστος αγοράς υβριδικών λεωφορείων .....  | 99 |
| <b>Πίνακας 5.11:</b> Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου υψηλού κόστους αγοράς υβριδικών .....   | 99 |
| <b>Πίνακας 5.12:</b> Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος αγοράς υβριδικών λεωφορείων.....  | 99 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Σχήμα 5.16:</b> Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος αγοράς υβριδικών λεωφορείων.....   | 99  |
| <b>Σχήμα 5.17:</b> Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος αγοράς υβριδικών.....                  | 100 |
| 5.4.6 Αποτελέσματα για χαμηλό κόστος αγοράς λεωφορείων φυσικού αερίου.....  | 101 |
| <b>Πίνακας 5.13:</b> Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου χαμηλού κόστους αγοράς λεωφορείων φυσικού αερίου .....   | 101 |
| <b>Πίνακας 5.14:</b> Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος αγοράς λεωφορείων φυσικού αερίου .....  | 102 |
| <b>Σχήμα 5.18:</b> Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος αγοράς λεωφορείων φυσικού αερίου .....  | 102 |
| <b>Σχήμα 5.19:</b> Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος αγοράς λεωφορείων φυσικού αερίου..... | 103 |
| 5.4.7 Αποτελέσματα για υψηλό κόστος αγοράς λεωφορείων φυσικού αερίου.....   | 105 |
| <b>Πίνακας 5.15:</b> Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου υψηλού κόστους αγοράς λεωφορείων φυσικού αερίου .....  | 105 |
| <b>Πίνακας 5.16:</b> Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος αγοράς λεωφορείων φυσικού αερίου.....  | 105 |
| <b>Σχήμα 5.20:</b> Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος αγοράς λεωφορείων φυσικού αερίου .....   | 106 |
| <b>Σχήμα 5.21:</b> Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος αγοράς λεωφορείων φυσικού αερίου ..... | 106 |
| 5.4.8 Αποτελέσματα για χαμηλό κόστος αγοράς ηλεκτροκίνητων λεωφορείων.....  | 108 |
| <b>Πίνακας 5.17:</b> Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου χαμηλού κόστους αγοράς ηλεκτροκίνητων .....  | 108 |
| <b>Πίνακας 5.18:</b> Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος αγοράς ηλεκτροκίνητων λεωφορείων .....  | 108 |
| <b>Σχήμα 5.22:</b> Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος αγοράς ηλεκτροκίνητων .....   | 109 |



|   |     |
|---|-----|
| <b>Σχήμα 5.23:</b> Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος αγοράς ηλεκτροκίνητων ..... | 109 |
| 5.4.9 Αποτελέσματα για υψηλό κόστος αγοράς ηλεκτροκίνητων λεωφορείων.....   | 111 |
| <b>Πίνακας 5.9:</b> Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου υψηλού κόστους αγοράς ηλεκτροκίνητων .....  | 111 |
| <b>Πίνακας 5.10:</b> Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος αγοράς ηλεκτροκίνητων λεωφορείων .....   | 111 |
| <b>Σχήμα 5.24:</b> Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος αγοράς ηλεκτροκίνητων .....  | 112 |
| <b>Σχήμα 5.25:</b> Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος αγοράς ηλεκτροκίνητων ..... | 112 |
| 5.4.10 Αποτελέσματα για χαμηλό κόστος πετρελαίου.....   | 114 |
| <b>Πίνακας 5.11:</b> Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου χαμηλού κόστους πετρελαίου .....   | 114 |
| <b>Πίνακας 5.12:</b> Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος πετρελαίου .....  | 114 |
| <b>Σχήμα 5.26:</b> Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος πετρελαίου .....  | 115 |
| <b>Σχήμα 5.27:</b> Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος πετρελαίου .....            | 115 |
| 5.4.11 Αποτελέσματα για υψηλό κόστος πετρελαίου .....   | 117 |
| <b>Πίνακας 5.13:</b> Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου υψηλού κόστους πετρελαίου .....  | 117 |
| <b>Πίνακας 5.14:</b> Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος πετρελαίου.....  | 117 |
| <b>Σχήμα 5.28:</b> Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος πετρελαίου .....   | 118 |
| <b>Σχήμα 5.29:</b> Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος πετρελαίου .....             | 118 |
| 5.4.12 Αποτελέσματα για χαμηλό κόστος ηλεκτρισμού .....   | 120 |
| <b>Πίνακας 5.15:</b> Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου χαμηλού κόστους ηλεκτρισμού.....   | 120 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Πίνακας 5.16:</b> Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος ηλεκτρισμού .....   | 120 |
| <b>Σχήμα 5.30:</b> Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος ηλεκτρισμού.....  | 121 |
| <b>Σχήμα 5.31:</b> Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος ηλεκτρισμού.....    | 121 |
| 5.4.13 Αποτελέσματα για υψηλό κόστος ηλεκτρισμού.....   | 123 |
| <b>Πίνακας 5.17:</b> Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου υψηλού κόστους πετρελαίου .....  | 123 |
| <b>Πίνακας 5.18:</b> Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος ηλεκτρισμού .....  | 123 |
| <b>Σχήμα 5.32:</b> Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος ηλεκτρισμού .....  | 124 |
| <b>Σχήμα 5.33:</b> Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος ηλεκτρισμού .....    | 124 |
| 5.4.14 Αποτελέσματα για χαμηλό κόστος φυσικού αερίου .....  | 126 |
| <b>Πίνακας 5.19:</b> Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου χαμηλού κόστους φυσικού αερίου.....  | 126 |
| <b>Πίνακας 5.20:</b> Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος φυσικού αερίου.....   | 126 |
| <b>Σχήμα 5.34:</b> Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος φυσικού αερίου .....  | 127 |
| <b>Σχήμα 5.35:</b> Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος φυσικού αερίου..... | 127 |
| 5.4.15 Αποτελέσματα για υψηλό κόστος του φυσικού αερίου .....   | 129 |
| <b>Πίνακας 5.21:</b> Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου υψηλού κόστους φυσικού αερίου.....   | 129 |
| <b>Πίνακας 5.22:</b> Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος φυσικού αερίου .....   | 129 |
| <b>Σχήμα 5.36:</b> Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος φυσικού αερίου.....  | 130 |
| <b>Σχήμα 5.37:</b> Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος φυσικού αερίου.....  | 130 |

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 5.4.16 | Αποτελέσματα για επιβολή προστίμου από την εκπομπή καυσαερίων .....   | 132 |
|        | <b>Πίνακας 5.23:</b> Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου επιβολής προστίμου για εκπομπή καυσαερίων .....  | 132 |
|        | <b>Πίνακας 5.24:</b> Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για επιβολή προστίμου για εκπομπή του CO <sub>2</sub> .....   | 132 |
|        | <b>Σχήμα 5.38:</b> Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για επιβολή προστίμου για εκπομπή του CO <sub>2</sub> .....   | 133 |
|        | <b>Σχήμα 5.39:</b> Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για επιβολή προστίμου για εκπομπή CO <sub>2</sub> ..... | 133 |
| 5.4.17 | Αποτελέσματα για προϋπολογισμό αγοράς λεωφορείων 40.000.000 ανά έτος... 135   |     |
|        | <b>Πίνακας 5.25:</b> Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου για προϋπολογισμό αγορών 40.000.000€.....  | 135 |
|        | <b>Πίνακας 5.26:</b> Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για όριο προϋπολογισμού αγορών 40.000.000€ .....  | 135 |
|        | <b>Σχήμα 5.40:</b> Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για όριο προϋπολογισμού αγορών 40.000.000€.....   | 136 |
|        | <b>Σχήμα 5.41:</b> Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για όριο περιορισμού αγορών 40.000.000€ .....           | 136 |
| 5.5    | Σύνθεση και Συνολικός Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....   | 138 |
|        | <b>Πίνακας 5.27:</b> Συγκεντρωτικός πίνακας σύγκρισης του τελικού κόστους όλων των σεναρίων .....   | 139 |
|        | <b>Σχήμα 5.42:</b> Ποσοστιαίες μεταβολές του τελικού κόστους σε κάθε σενάριο .....  | 140 |
|        | <b>Πίνακας 5.28:</b> Συγκεντρωτικός πίνακας των 17 προβλημάτων βελτιστοποίησης με βάση το συνολικό αριθμό λεωφορείων που χρησιμοποιούνται.....  | 142 |
|        | <b>Σχήμα 5.43:</b> Σύνολο λεωφορείων που χρησιμοποιείται για μεταβολή στο αντίστοιχο κόστος με το οποίο σχετίζεται άμεσα .....  | 143 |
|        | <b>Σχήμα 5.44:</b> Σύνολο λεωφορείων που χρησιμοποιούνται για κάθε σενάριο μεταβολής κόστους .....  | 143 |
|        | <b>Πίνακας 5.29:</b> Συγκεντρωτικός πίνακας των 17 προβλημάτων βελτιστοποίησης με βάση το συνολικό αριθμό λεωφορείων που αγοράζονται .....  | 145 |
|        | <b>Σχήμα 5.45:</b> Σύνολο λεωφορείων που αγοράζονται για μεταβολές στα αντίστοιχα κόστη με τα οποία σχετίζονται .....   | 146 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Πίνακας 5.30:</b> Συγκεντρωτικός πίνακας των 17 προβλημάτων βελτιστοποίησης με βάση το μέσο όρο ηλικίας των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται ..... | 147 |
| 6.....   | 149 |
| Συμπεράσματα .....   | 149 |
| 6.1 Ανασκόπηση Διπλωματικής Εργασίας .....   | 149 |
| <b>Πίνακας Π1:</b> Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων .....  | 151 |
| 6.2 Συμπεράσμα .....   | 152 |
| 6.3 Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα.....  | 154 |
| 7.....   | 156 |
| Βιβλιογραφία.....  | 156 |

## 1.1 Γενική ανασκόπηση

Οι Αστικές Συγκοινωνίες αποτελούν κοινωνικό αγαθό, παρέχοντας ίσες ευκαιρίες ποιοτικής και ασφαλούς μετακίνησης προς όλους τους πολίτες. Η εξάπλωση της χρήσης των Μ.Μ.Μ. μειώνει τα οδικά ατυχήματα με τις κοινωνικές και οικονομικές συνέπειές τους και παρέχει τη δυνατότητα μετακίνησης ιδιαίτερα στις κατηγορίες εκείνες των πολιτών, που δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν ιδιωτικά μέσα μεταφοράς, λόγω περιορισμένης φυσικής ή οικονομικής κατάστασης. Αποτελούν, επίσης, τη σημαντικότερη συνιστώσα για τη βιώσιμη ανάπτυξη στην ευρύτερη περιοχή των πόλεων, συντελώντας στην προστασία του περιβάλλοντος μέσω μείωσης της ρύπανσης της ατμόσφαιρας, του θορύβου αλλά και εξοικονόμησης του αστικού χώρου, δεδομένου ότι απαιτούν πολύ μικρή ωφέλιμη επιφάνεια οδικού δικτύου και χώρων στάθμευσης ανά μεταφερόμενο επιβάτη. Η ανάδειξη των Μ.Μ.Μ. σε παράγοντα οικονομικής και κοινωνικής ανάπτυξης, προϋποθέτει την ένταξη όλων των μέσων μεταφοράς σε ένα ενιαίο και ολοκληρωμένο σύστημα μετακινήσεων του πολίτη. Καθώς, μάλιστα, τα θέματα περιβάλλοντος και ενέργειας που συνδέονται με τις μεταφορές αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία για την οικονομική και κοινωνική πρόοδο των αστικών περιοχών, η ολοκλήρωση της λειτουργίας των Μ.Μ.Μ. σε ένα σύστημα έχει την κύρια προτεραιότητα. **Βασικό στόχο αποτελεί ο καθορισμός του γενικού προγραμματισμού επιδιορθώσεων και της κατανομής των αναγκαίων πόρων ώστε ο Ο.Α.Σ.Α. να επιτελεί τους σκοπούς του.** Για τον σκοπό αυτό έχει αναπτυχθεί πλήθος προτύπων και μεθόδων με τα οποία είναι δυνατή η πραγματοποίηση ικανοποιητικών προβλέψεων της μελλοντικής κατάστασης των λεωφορείων, ο έλεγχος και η βελτίωση της αξιοπιστίας και η ορθολογική διαχείριση των οικονομικών πόρων για τη λειτουργία του οργανισμού..

### 1.1.1 Η ελληνική πραγματικότητα

Σήμερα, οι αστικές συγκοινωνίες της Αθήνας μεταφέρουν καθημερινά περίπου 2.650.000 επιβάτες ή ετησίως 750.000.000 επιβάτες. Στο σύνολό τους εξυπηρετούν άνω του 36% του συνόλου των μετακινήσεων, που πραγματοποιούνται στην Αθήνα. Τα λεωφορεία και τα τρόλεϊ εξυπηρετούν το 62% περίπου των μετακινήσεων, που γίνονται με δημόσιες συγκοινωνίες, δηλαδή, εξακολουθούν να αποτελούν τα βασικά μεταφορικά μέσα για τους κατοίκους της πρωτεύουσας. Ο μακροπρόθεσμος στόχος του συστήματος των αστικών συγκοινωνιών είναι να φθάσουν να καλύπτουν το 50% του συνόλου των μετακινήσεων, που πραγματοποιούνται στην πρωτεύουσα. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος απαιτείται ριζική βελτίωση του επιπέδου εξυπηρέτησης, που παρέχουν οι αστικές συγκοινωνίες με ταυτόχρονη εφαρμογή συγκεκριμένης πολιτικής για τα ανταγωνιστικά μεταφορικά μέσα, δηλαδή τα ΙΧ και τα ταξί, που θα αποβλέπει στον ίδιο στόχο (π.χ. πολιτική στάθμευσης, πολιτική επενδύσεων στα δημόσια έργα, νέα αντίληψη για την αντιμετώπιση του κυκλοφοριακού προβλήματος της πόλης, πολιτική για τη διαχείριση της κινητικότητας των κατοίκων, νέος ρόλος για τα ταξί κ.λπ.). Ο Οργανισμός Αστικών Συγκοινωνιών Αθηνών (Ο.Α.Σ.Α.) είναι υπεύθυνος για το σχεδιασμό, προγραμματισμό, οργάνωση, συντονισμό, έλεγχο και παροχή συγκοινωνιακού έργου όλων των μέσων δημόσιας μεταφοράς (λεωφορεία, τρόλεϊ, μετρό, τραμ και προαστιακός) στην ευρύτερη αστική περιοχή της πρωτεύουσας. Στο πλαίσιο της υποχρέωσής του για το στρατηγικό σχεδιασμό του Συστήματος Αστικών Συγκοινωνιών και τη βελτίωση της αποδοτικότητάς του, εφαρμόζει μέτρα και πολιτικές για όλα τα ΜΜΜ της περιοχής ευθύνης του, με ιδιαίτερη μέριμνα, ώστε να εισαχθούν καινοτόμες λειτουργικές λύσεις και προηγμένη τεχνολογία. Για το σκοπό αυτό εξετάζονται και νέοι τύποι λεωφορείων, όπως τα ηλεκτροκίνητα.

Επομένως, τίθεται η ανάγκη για την βέλτιστη δυνατή διαχείριση των λεωφορείων με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Αυτή έχει ως στόχο την αποτελεσματική χρήση και συντήρηση των λεωφορείων. Βασικοί στόχοι της συντήρησης αποτελούν οι:

- Η δυνατότητα πρόβλεψης της μελλοντικής κατάστασης των λεωφορείων
- Ο προσδιορισμός των απαιτούμενων ενεργειών σχετικά με τη χρήση των λεωφορείων
- Ο προσδιορισμός και η κατανομή των ενεργειών αυτών με την αγορά ή την πώληση των λεωφορείων

## 1.2 Στόχος Διπλωματικής Εργασίας

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αποτελεί η ανάπτυξη ενός μοντέλου βελτιστοποίησης, για την κατανομή πόρων για τη διαχείριση του στόλου λεωφορείων του Ο.Α.Σ.Α.. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε η ανάπτυξη ενός προγράμματος χρήσης, αγοράς και πώλησης των λεωφορείων με χρονικό ορίζοντα είκοσι ετών και με βασικό περιορισμό τη διάθεση των ελάχιστων πόρων. Οι τέσσερις βασικές κατηγορίες οχημάτων που εξετάστηκαν είναι : 1) πετρελαιοκίνητα, 2) υβριδικά, 3) φυσικού αερίου, 4) ηλεκτροκίνητα.

## 1.3 Μεθοδολογία

Πιο συγκεκριμένα, στο υποκεφάλαιο αυτό περιγράφεται συνοπτικά η συγκεκριμένη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επίτευξη του στόχου της Διπλωματικής Εργασίας.

Αρχικά καθορίστηκε το αντικείμενο που θα εξέταζε η παρούσα Διπλωματική Εργασία καθώς και ο επιδιωκόμενος στόχος. Για την υλοποίηση του στόχου πραγματοποιήθηκε ευρεία **βιβλιογραφική ανασκόπηση** τόσο σε ελληνικό όσο και σε διεθνές επίπεδο. Αναζητήθηκαν, δηλαδή, έρευνες με θέμα συναφές με εκείνο της Διπλωματικής Εργασίας τόσο σε ελληνικό, όσο και σε διεθνές επίπεδο. Στη φάση αυτή πραγματοποιήθηκε αναζήτηση παρεμφερών ερευνών, επιστημονικών άρθρων, καθώς επίσης και γενικών πληροφοριών σχετικά με το θέμα που θα μπορούσαν να φανούν χρήσιμες για τη συγκεκριμένη Διπλωματική Εργασία. Μέσω των παρεμφερών ερευνών καταβλήθηκε προσπάθεια να αποκτηθεί μία σχετική εμπειρία στην επεξεργασία τέτοιων θεμάτων, καθώς και να αποφασιστεί η μέθοδος με βάση την οποία θα πραγματοποιηθεί η επεξεργασία των στοιχείων και θα επιτευχθεί ο επιδιωκόμενος στόχος.

Μετά την ολοκλήρωση της αναζήτησης βιβλιογραφικών αναφορών, σειρά είχε η εύρεση του τρόπου **συλλογής των στοιχείων**. Πηγή της προέλευσης των στοιχείων αποτέλεσε κατά κύριο λόγο το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας των Η.Π.Α.(www.nrel.gov). Στη συνέχεια, τα στοιχεία καταχωρήθηκαν σε ηλεκτρονική βάση δεδομένων, η οποία βελτιώθηκε σταδιακά, έως ότου αποκτήσει την τελική της μορφή. Ακολούθησε η **επιλογή της μεθόδου** στατιστικής επεξεργασίας των στοιχείων. Την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου διαδέχτηκε η ανάπτυξη των μαθηματικών μοντέλων, η εφαρμογή τους και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Τέλος, προέκυψαν τα συμπεράσματα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Στο **Σχήμα 1.1**, παρουσιάζονται, υπό μορφή διαγράμματος ροής, τα διαδοχικά στάδια που ακολουθήθηκαν κατά την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας.



**Σχήμα 1.1:** Διάγραμμα των σταδίων εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας

#### 1.4 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η δομή της διπλωματικής εργασίας, μέσω της συνοπτικής αναφοράς στο περιεχόμενο των κεφαλαίων της.

Στο **Κεφάλαιο 1** γίνεται μια **εισαγωγή** στο αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας, προκειμένου να προσδιοριστεί ο στόχος της. Αποτελεί τη βάση για την κατανόηση του αντικείμενου της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Αρχικά, γίνεται μια γενική ανασκόπηση, όπου επισημαίνεται η αναγκαιότητα της διαχείρισης του στόλου λεωφορείων και δίνεται ένας ορισμός αυτής. Ύστερα, γίνεται αναφορά τον Ο.Α.Σ.Α. και στην σημασία συντήρησης αυτών. Ακόμη, αναφέρεται η σημασία των ελληνικών λιμένων για την χώρα. Εν συνεχεία, καταγράφεται με μεγαλύτερη σαφήνεια ο στόχος που πρόκειται να επιτευχθεί μέσα από την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας. Τέλος, περιγράφεται συνοπτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την αντιμετώπιση του αντικείμενου της Διπλωματικής Εργασίας. Για την καλύτερη αντίληψη αυτής, παρατίθεται και ένα διάγραμμα ροής, που απεικονίζει την αλληλουχία των ενεργειών που πραγματοποιήθηκαν με μεγαλύτερη σαφήνεια.

Στο **Κεφάλαιο 2**, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της **βιβλιογραφικής ανασκόπησης**, όπως αυτά προέκυψαν από την αναζήτηση ερευνών με παρεμφερές αντικείμενο. 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. Στο τέλος του



κεφαλαίου, συνοψίζονται οι μεθοδολογίες όλων των ερευνών που εξετάστηκαν, καταγράφονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματά τους και γίνεται μια συγκριτική αξιολόγησή τους, προκειμένου να διαπιστωθεί εάν και κατά πόσον κάποιες από αυτές είναι ικανές να συμβάλλουν στην παρούσα Διπλωματική Εργασία.

Στο **Κεφάλαιο 3**, που αφορά το **θεωρητικό υπόβαθρο**, αναλύεται η επιλεγείσα μεθοδολογία και περιγράφεται η οικογένεια στην οποία ανήκει. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται η μεθοδολογία και οι προϋποθέσεις εφαρμογής του γραμμικού προγραμματισμού και του ακέραιου προγραμματισμού αντίστοιχα.

Στο **Κεφάλαιο 4**, γίνεται η παρουσίαση των διαδικασιών της **συλλογής και επεξεργασίας των στατιστικών στοιχείων**, στα οποία στηρίχθηκε η Διπλωματική Εργασία, ενώ περιγράφεται και το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε.

Στο **Κεφάλαιο 5** πραγματοποιείται η αναλυτική **περιγραφή της μεθόδου** που εφαρμόστηκε ως την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων κατά την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον τρόπο εισαγωγής των στατιστικών στοιχείων παραθέτοντας διαδοχικές οθόνες εκτέλεσης της επεξεργασίας των στοιχείων, ενώ επισημαίνονται τα κρίσιμα σημεία στη λειτουργία του λογισμικού. Έπειτα, περιγράφονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την εφαρμογή της μεθόδου και παρουσιάζεται η διαδικασία ανάπτυξης μαθηματικού μοντέλου. Καταγράφονται, δηλαδή, τα δεδομένα εισόδου και εξόδου. Ακόμη, στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η εφαρμογή διαφορετικών σεναρίων της μεθοδολογίας, ενώ στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται η σύγκριση των επιμέρους σεναρίων.

Στο **Κεφάλαιο 6**, το οποίο αποτελεί το τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας περιλαμβάνονται τα **συνολικά συμπεράσματα** που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθοδολογίας. Επιπρόσθετα, καταγράφονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στο αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας είτε με άλλες μεθόδους, είτε με εξέταση πρόσθετων παραμέτρων και μεταβλητών.

Στο **Κεφάλαιο 7**, παρατίθεται ο **κατάλογος των βιβλιογραφικών αναφορών**, που αφορούν έρευνες παρεμφερείς με αυτή της Διπλωματικής Εργασίας που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

## Βιβλιογραφική Επισκόπηση

---

### 2.1 Γενικά

Το κεφάλαιο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης περιλαμβάνει την παρουσίαση και ανασκόπηση αφενός των αποτελεσμάτων από έρευνες συναφείς με το αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας και αφετέρου μεθοδολογιών συναφών με τη μεθοδολογία της Διπλωματικής Εργασίας. Και στις δύο περιπτώσεις εξετάζονται εργασίες από την Ελλάδα και το εξωτερικό. Και στα δύο μέρη της βιβλιογραφικής ανασκόπησης παρατίθεται σύνοψη της κάθε εξεταζόμενης εργασίας που περιλαμβάνει το πλαίσιο της έρευνας, τη μεθοδολογία και τα βασικά αποτελέσματα με έμφαση στα στοιχεία με συνάφεια με το αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας. Στο τέλος παρατίθεται σύνθεση των βασικών σημείων όλων των εργασιών που εξετάστηκαν με στόχο αφενός να προκύπτει η αναγκαιότητα εξέτασης του αντικειμένου της Διπλωματικής Εργασίας και αφετέρου να αιτιολογείται η επιλογή της υιοθετηθείσας μεθοδολογίας.

Ο στόχος της ανασκόπησης αποτελεσμάτων από έρευνες συναφείς με το αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας είναι να προσδιοριστούν όλες οι συναφείς έρευνες επιτρέποντας τον προσδιορισμό του αντικειμένου της Διπλωματικής Εργασίας, το οποίο δεν έχει καλυφθεί πλήρως (τουλάχιστον στην Ελλάδα), συμπληρώνοντας έτσι τις υπάρχουσες εργασίες. Επιπλέον, η ανασκόπηση συναφών ερευνών επιτρέπει τον έλεγχο εάν τα αποτελέσματα της Διπλωματικής Εργασίας συμφωνούν με εκείνα της διεθνούς βιβλιογραφίας, διευκολύνοντας έτσι την ερμηνεία τους.

Ο στόχος της ανασκόπησης μεθοδολογιών συναφών με τη μεθοδολογία της Διπλωματικής Εργασίας 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 επιλεγείσας μεθοδολογίας, διευκολύνοντας την εφαρμογή της κατά την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας.

## 2.2 Εφαρμογές Βελτιστοποίησης - Συναφείς Έρευνες

### 2.2.1 Μελέτες συσχέτισης κόστους λειτουργίας και συντήρησης με ηλικία λεωφορείων

Αρχίζοντας το 1975, οι **Wabe και Coles** διερεύνησαν το κόστος του στόλου μέσω μαζικής μεταφοράς με την πάροδο του χρόνου. Παρατήρησαν ότι αυξάνεται το κόστος λειτουργίας και συντήρησης καθώς ο αυξάνεται η ηλικία των λεωφορείων (Wabe & Coles, 1975).

Οι μεταγενέστερες μελέτες των **Williams (1979)** και των **Berechman και Giuliano (1984)** έδειξαν παρόμοιες συσχετίσεις του αυξανόμενου κόστους λειτουργίας και συντήρησης με την ηλικία του στόλου.

### 2.2.2 Μελέτες σχετικές με την προληπτική συντήρηση

Οι **Simms et al. (1982)** έχουν μελετήσει τις βέλτιστες πολιτικές αγοράς, λειτουργίας και αντικατάστασης λεωφορείων σε σχέση με την προληπτική συντήρηση (preventive maintenance). Οι οργανισμοί διαχείρισης στόλου λεωφορείων εφαρμόζουν χρονοδιαγράμματα προληπτικής συντήρησης για να διατηρούν τα λεωφορεία σε καλή λειτουργική κατάσταση και να μειώνουν το ποσό των προγραμματιστών διακοπών λειτουργίας. Ωστόσο, τα λεωφορεία εξακολουθούν να αντιμετωπίζουν λειτουργικές βλάβες.

**O Rust (1987)** ολοκλήρωσε τη μέση απροσδόκητη κατανομή και το κόστος προληπτικής συντήρησης για να βοηθήσει στην ποσοτικοποίηση της βέλτιστης ηλικίας αντικατάστασης ενός λεωφορείου. Ωστόσο, αυτή η μελέτη ασχολήθηκε κυρίως με ζητήματα κινητήρων και δεν συμπεριέλαβε άλλα εφικτά προβλήματα που συμβαίνουν στα υπόλοιπα μέρη των λεωφορείων.

### 2.2.3 Μελέτες σχετικές με αντικατάσταση, ανακατασκευή, αποκατάσταση λεωφορείων

Το κόστος αντικατάστασης, ανακατασκευής και αποκατάστασης (replacement, remanufacture, rehabilitation) λεωφορείων αποτέλεσε το επίκεντρο της έρευνας των **Khasnabis et al. (2000, 2002)**. Ο ίδιος και οι συνάδελφοί του εκτίμησαν το κόστος της ανακατασκευής των κύριων στοιχείων του λεωφορείου ή/και της αποκατάστασης των πλασιών των λεωφορείων με βάση προηγούμενες μελέτες (**Bridgeman et al., 1983**).

Αυτά τα κόστη στη συνέχεια ενσωματώθηκαν σε ένα μοντέλο αντικατάστασης σειράς για τον προσδιορισμό του χρόνου αντικατάστασης που ελαχιστοποιεί το κόστος.

Περαιτέρω έρευνα από τους **Mishra et al. (2010)** ολοκλήρωσε παρόμοια ζητήματα αντικατάστασης και ανακατασκευής, αλλά προέβη σε ένα ακόμη βήμα για τον τρόπο με τον οποίο η Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Διαμετακόμισης (FTA) πρέπει να καταλείπει καλύτερα τα κεφάλαιά της για χορήγηση κεφαλαίων σε οργανισμούς διαμετακόμισης με βάση την ζήτηση. Οι συνεισφορές των ερευνητών αυτών είναι να η διερεύνηση των τρόπων προσδιορισμού της βέλτιστης αντικατάστασης λεωφορείων με βάση προληπτικά και μη προγραμματισμένα έξοδα συντήρησης.

#### 2.2.4 Μελέτες συσχέτισης χρήσης λεωφορείων με την ηλικία τους

Η έρευνα που παρατηρεί τη μειωμένη χρήση λεωφορείων με την αύξηση της ηλικίας τους ξεκίνησε τη δεκαετία του 1960, με τους **Eilon et al. (1966)**. Αργότερα, τα λεωφορεία μοντελοποιήθηκαν με διαφορετικά επίπεδα χρήσης (**Simms et al., 1984**). Ο **Redmer (2005)** υπολόγισε τη βέλτιστη οικονομική ζωή της εκμετάλλευσης ενός εμπορευματικού φορτηγού χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο που βασίστηκε στην έρευνα του (**Eilon et al., 1966**) χρησιμοποιώντας δεδομένα κόστους εμπορευματικών φορτηγών. Οι **Buddhakulsomsiri και Parthanadee (2006)** έχουν παρατηρήσει περαιτέρω τις πραγματικές τάσεις του στόλου για μειωμένη χρήση σχετικά με την ηλικία. Η παρατήρηση αυτού του φαινομένου έχει οδηγήσει σε πιο εξελιγμένες έρευνες για την ελαχιστοποίηση του κόστους του στόλου.

Οι **Simms et al. (1984)** περιέγραψαν μια βέλτιστη πολιτική αγορών, εκμεταλλεύσεων και πωλήσεων για ένα στόλο αστικών λεωφορείων του οποίου τα μέλη λειτουργούσαν σε διαφορετικά επίπεδα ανάλογα με την ηλικία του εξοπλισμού. Μείωσαν το πρόβλημα σε δύο επίπεδα χρήσης: τα νέα λεωφορεία λειτουργούσαν σε ένα συνεχώς υψηλό επίπεδο ανταποκρινόμενα στη βασική ζήτηση, ενώ η χρήση ήταν συνεχώς χαμηλή για τα λεωφορεία ηλικίας άνω των δέκα ετών επειδή χρησιμοποιούνταν μόνο όταν ήταν απαραίτητο για να καλύψουν την αιχμή της ζήτησης. Σε αντίθεση με την απόφαση αντικατάστασης σε άλλους φορείς παροχής υπηρεσιών μεταφορών, οι υποθέσεις τους που αφορούσαν την αξιοποίηση των λεωφορείων ήταν ελεγχόμενες.

Ο **Redmer (2005)** μελέτησε το βέλτιστο όριο ζωής ή την οικονομική ζωή του στόλου εμπορευματικών φορτηγών, που έδειξε μειωμένη λειτουργία καθώς ο εξοπλισμός μεγάλων ηλικιακά και σταθερά επίπεδα λειτουργίας όσο ο εξοπλισμός ήταν καινούργιος. Η βάση του μοντέλου του ήταν η προσέγγιση της Ανάλυσης του Κύκλου

Ζωής (Life Cycle Cost Analysis) από τους **Eilon et al. (1966)**, στην οποία έγινε η θεώρηση σταθερής λειτουργίας και συνεπώς δεν είχε άμεση εφαρμογή στον εξεταζόμενο στόλο. Οι Eilon et al. έλαβαν υπόψη το κόστος ανάλυσης ανά μονάδα χρόνου. Ο Redmer κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο του Eilon εξήγαγε ως αποτέλεσμα ότι τα όρια ζωής πλησιάζουν στο άπειρο, όταν τα στοιχεία του στόλου έδειξαν μείωση της χρήσης με την ηλικία. Αντί να χρησιμοποιήσει το κόστος ανά μονάδα χρόνου, ο Redmer τροποποίησε την προσέγγιση LCCA του Eilon, έτσι ώστε να έχει ως αποτέλεσμα, κόστος ανά χιλιόμετρο. Με αυτόν τον τρόπο, τα μειωμένα έξοδα ιδιοκτησίας ανά χιλιόμετρο ελαχιστοποιήθηκαν σε σχέση με την ηλικία αντικατάστασης και εξήχθη ως αποτέλεσμα μια εφικτή οικονομική ζωή που ελαχιστοποιεί το κόστος.

Μια ακόμα μελέτη που υπογραμμίζει τη σημασία της μείωσης των επιπέδων χρήσης πέρα από την ηλικία του εξοπλισμού δημοσιεύθηκε από τους **Buddhakulsomsiri και Parthanadee (2006)**. Το μοντέλο τους υιοθετήθηκε από τον **Hartman (1999)**. Μια σημαντική διαφορά ήταν ότι στο μοντέλο του Hartman, η χρήση καθορίστηκε ως μια μεταβλητή απόφασης, ενώ στις μελέτες των Buddhakulsomsiri και Parthanadee υποτίθεται ότι η χρησιμοποίηση ανά τάξη ηλικίας ήταν σταθερή και έτσι η χρησιμοποίηση ήταν μια παράμετρος του μοντέλου. Οι υποθέσεις τους σχετικά με τα επίπεδα χρησιμοποίησης ήταν ίδιες με τις υποθέσεις που έγιναν από τον Redmer. Επιπλέον, οι Buddhakulsomsiri και Parthanadee εξήγησαν ότι η μείωση της χρήσης μπορεί να προκύψει από ένα μοντέλο εξαρτημένης χρήσης: "Δεδομένου ότι τα διάφορα λεωφορεία είναι διαθέσιμα να παρέχουν την ίδια υπηρεσία ή να εκτελούν την ίδια λειτουργία, τότε τα νεότερα προτιμώνται περισσότερο." Τελικά, με την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους αγοράς, πώλησης, κατοχής και λειτουργίας μονάδων εξοπλισμού σε ένα πεπερασμένο χρονικό ορίζοντα, οι Buddhakulsomsiri και Parthanadee παρείχαν στο στόλο ένα συγκεκριμένο και ελάχιστο κόστος αγοράς, εκμετάλλευσης και πώλησης πολιτικής.

Μερικοί ερευνητές έχουν επικεντρωθεί στη στατιστική ανάλυση των δεδομένων του στόλου και στις σχέσεις μεταξύ ηλικίας, χρήσης και κόστους (Chen and Lin, 2006). Οι Kim et al. (2009) έχουν διερευνήσει την ηλικία, την ετήσια χρήση και τη σωρευτική χρήση για να προσδιορίσουν εάν η χρήση των οχημάτων μειώνεται κατά την αύξηση της ηλικίας. Διερεύνησαν εάν η χρήση οχημάτων σε σταθερή ή μειούμενη ποσότητα είναι η πιο οικονομική στρατηγική αξιοποίησης.

### 2.2.5 Μελέτες συσχέτισης κόστους λεωφορείων με κατανάλωση καυσίμου

Προηγούμενες μελέτες στον τομέα των δημόσιων συγκοινωνιών έχουν δείξει πώς η αποδοτικότητα και η λειτουργία των καυσίμων και το κόστος συντήρησης αλλάζουν κατά την ηλικία των οχημάτων. Έχουν διαπιστωθεί σημαντικές διαφορές μεταξύ των μοντέλων λεωφορείων, των οργανισμών διαχείρισης λεωφορείων και των συνθηκών εξυπηρέτησης (**Lammert 2008, Chandler and Walkowicz 2006, Schiavone 1997**). Τα κόστη κύκλου ζωής των λεωφορείων έχουν προηγουμένως συγκριθεί με τους τύπους κινητήρων των λεωφορείων και με τα μοντέλα σχεδιασμού (**Clark et al., 2007, Laver et al., 2007, Clark κ.ά., 2009, Kim et al., 2009**). Τα βέλτιστα προγράμματα αντικατάστασης και η επιλογή τύπου λεωφορείου που ελαχιστοποιούν το συνολικό καθαρό κόστος του στόλου λεωφορείων δεν έχουν μελετηθεί στις προαναφερθείσες αναφορές.

Έχουν διεξαχθεί μελέτες οι οποίες υπολόγισαν το κόστος των λεωφορείων για την κατανάλωση καυσίμου και την παραγωγή εκπομπών καυσαερίων με διαφορετικές πλατφόρμες κινητήρων λεωφορείων όπως συμβατικά και υβριδικά λεωφορεία (**Chandler & Walkowicz, 2006, Clark et al., 2009**). Αλλά δεν βρίσκουν τη βέλτιστη αντικατάσταση της αντικατάστασης λεωφορείων μέσω μοντέλων βελτιστοποίησης. Τα λεωφορεία έχουν υποστεί κάποια δυναμική μοντελοποίηση αντικατάστασης προγραμματισμού (**Keles & Hartman, 2004**). Ωστόσο, δεν δόθηκε σημαντική προσοχή για το κόστος συντήρησης, τις στρατηγικές αξιοποίησης, τις τεχνολογίες οχημάτων, τις εκπομπές και τις επιπτώσεις της μεταβλητότητας της αγοράς που απαιτούνται για τη δημιουργία ενός ισχυρού μοντέλου αντικατάστασης, ούτε για την εξεύρεση της βέλτιστης ηλικίας αντικατάστασης.

Ένα τυπικό μοντέλο βελτιστοποίησης, το οποίο ασχολείται με ένα παρόμοιο αλλά γενικότερο θέμα μοντέλων αντικατάστασης εξοπλισμού, εισήχθη για πρώτη φορά στη δεκαετία του 1950 (**Bellman, 1955**). Οι **Rees et al. (1982)** και **Khasnabis et al. (2003)** ανέλυσαν προβλήματα σχετικά με την αντικατάσταση του εξοπλισμού του στόλου. Οι **Khasnabis et al. (2003)** υποθέτουν ότι οι μεταβλητές εισόδου όπως η αγορά, η χρήση και η ζήτηση ήταν γνωστές.

### 2.2.6 Μελέτες σύγκρισης παράλληλης αντικατάστασης με σειράς

Μια άλλη σημαντική εξέλιξη ήταν η προσθήκη μοντέλων παράλληλης αντικατάστασης. Η διαφορά μεταξύ σειράς και παράλληλων μοντέλων είναι ότι τα σειράς ασχολούνται με ένα περιουσιακό στοιχείο κάθε χρονική στιγμή ενώ τα παράλληλα ασχολούνται με πολλαπλά περιουσιακά στοιχεία, το καθένα με δυνητικά διαφορετικά μοντέλα κόστους. Η έρευνα σε αυτό το θέμα ξεκίνησε με τους **Jones et al. (1991)**, όπου ενσωμάτωσαν το κόστος λειτουργίας και συντήρησης της ηλικίας μιας μηχανής. Άλλα μοντέλα έχουν ασχοληθεί με την αντικατάσταση του μηχανήματος ή του οχήματος που περιορίζεται από τον προϋπολογισμό (**Karabakal et al., 1994**), από παραμέτρους με μεταβαλλόμενη λειτουργία (**Bethuynne, 1998**) και τις στοχαστικές απαιτήσεις (**Hartman, 2001**), σειράς έναντι παράλληλης αντικατάστασης (**Chand et al. 2002**) και διάφορους τύπους οχημάτων (**Hartman, 2004**). Οι **Kim et al. (2003)** ενσωμάτωσαν τους συντελεστές απωλειών κατά την κατασκευή οχημάτων σε μια μορφή ανάλυσης κύκλου ζωής (Life Cycle Analysis Form), υποδεικνύοντας πότε είναι πιο οικονομικό να αντικατασταθεί ένα όχημα.

### 2.2.7 Οικονομική ανάλυση μοντέλου και ανάλυση κόστους-οφέλους (Η ανάλυση αποδοτικότητας κόστους)

Ο **Appleby (1993)** χρησιμοποίησε το μοντέλο οικονομικής ζωής (economic life problem) για να μελετήσει τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται συνήθως από δημόσιους οργανισμούς. Σε αυτό το πρόβλημα αντικατάστασης, χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση αποδοτικότητας του κόστους για να δοθεί προτεραιότητα στον στόλο που θα αντικατασταθεί κάτω από δημοσιονομικούς περιορισμούς.

Οι **Randhawa et al.** ανέπτυξαν πλάνα για μεγάλης κλίμακας πρόβλημα αντικατάστασης του στόλου με περιορισμό του προϋπολογισμού για το Τμήμα Μεταφορών του Όρεγκον. Η προσέγγιση της οικονομικής ζωής χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της συνιστώμενης ζωής αντικατάστασης. Τα αποτελέσματα του μοντέλου οικονομικής ζωής προσαρμόστηκαν στη συνέχεια, με βάση διαχειριστικά και επιχειρησιακά ζητήματα, για την ανάπτυξη προτεραιοτήτων αντικατάστασης. Η ανάλυση οφέλους-κόστους χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των βέλτιστων επιπέδων επενδύσεων.

## 2.2.8 Μελέτες σχετικές με τη βέλτιστη πολιτική διαχείρισης στόλου λεωφορείων

**Οι Simms et al.** ανέπτυξαν ένα μοντέλο για τον προσδιορισμό της βέλτιστης πολιτικής αγοράς, εκμετάλλευσης και πώλησης για ένα στόλο οχημάτων, επιλέγοντας ως κριτήριο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους στον ορίζοντα πεπερασμένου προγραμματισμού. Για την εφαρμογή του μοντέλου δυναμικού προγραμματισμού γίνεται ανάλυση δύο σταδίων. Η ανάλυση του πρώτου σταδίου είναι να προσδιοριστεί η πολιτική αξιοποίησης που θα ελαχιστοποιήσει το λειτουργικό κόστος. Η ανάλυση του δεύτερου σταδίου επιλέγει το βέλτιστο λειτουργικό κόστος λαμβάνοντας υπόψη ένα συγκεκριμένο μείγμα στόλων που βρίσκεται στο πρώτο στάδιο. Η πολιτική που απαιτείται για την αντικατάσταση του λεωφορείου οδηγεί σε μια σειρά συνδυασμών στόλου για κάθε περίοδο κατά τον ορίζοντα σχεδιασμού. Οι συγγραφείς ασχολήθηκαν με διάφορους παράγοντες, όπως η ζήτηση των οχημάτων που απαιτούνται στο στόλο, η χρήση από την άποψη των χιλιομέτρων διαδρομής που πρέπει να ικανοποιηθεί από τον στόλο και η ελάχιστη ηλικία για ένα λεωφορείο που πρέπει να ληφθεί υπόψη στην απόφαση πώλησης.

Οι συγγραφείς **Khasnabis et al. (2010)** παρουσιάζουν μια διαδικασία κατανομής πόρων μεταξύ των οργανισμών διαμετακόμισης για τη διαχείριση του στόλου διαμετακόμισης, με ιδιαίτερη έμφαση στην αγορά νέων λεωφορείων και την ανακατασκευή των υφισταμένων λεωφορείων. Το μοντέλο διατυπώνεται ως πρόβλημα μη γραμμικής βελτιστοποίησης μεγιστοποίησης της συνολικής μέσης σταθμισμένης μέσης υπολειπόμενης ζωής του στόλου που υπόκειται σε δημοσιονομικούς, πολιτικούς και άλλους περιορισμούς. Το πρόβλημα επιλύεται χρησιμοποιώντας τον αέριο προγραμματισμό και η εφαρμογή του αποδεικνύεται μέσω μιας μελέτης περιπτώσεων που χρησιμοποιεί δεδομένα πραγματικού στόλου αστικών συγκοινωνιών της πόλης Michigan. Αυτό το προτεινόμενο μοντέλο είναι μια επέκταση προηγούμενης έρευνας σε μια μέθοδο διαδοχικής βελτιστοποίησης δύο σταδίων που λύνεται με γραμμικό προγραμματισμό. Το προτεινόμενο μοντέλο έχει μια δομή ενός σταδίου που έχει σχεδιαστεί για να επιτύχει μια καλύτερη λύση, διαθέτοντας πόρους μεταξύ διαφορετικών επιλογών βελτίωσης και διαφορετικών οργανισμών σε ένα μόνο βήμα. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις δύο μεθόδους δείχνει ότι ενώ και οι δύο προσεγγίσεις είναι βιώσιμες, η προσέγγιση ενός σταδίου παράγει καλύτερα αποτελέσματα. Το προτεινόμενο μοντέλο, όπως καταδεικνύεται στην μελέτη περίπτωσης, θεωρείται πιο ισχυρό, συμπαγές, αποτελεσματικό και κατάλληλο τόσο για βραχυπρόθεσμο όσο και για μακροχρόνιο σχεδιασμό. Η σημαντικότερη συμβολή αυτής της μελέτης είναι η ανάπτυξη μιας ενιαίας μεθοδολογίας για την κατανομή των πόρων μεταξύ των διαφόρων επιλογών βελτίωσης και των διαφόρων οργανισμών σε ένα μόνο βήμα. Αυτή η μελέτη κατέδειξε ότι μια βέλτιστη στρατηγική για πολλαπλά έτη για την αντικατάσταση στόλου μπορεί να αναπτυχθεί για έναν κρατικό οργανισμό αστικών συγκοινωνιών, λαμβάνοντας υπόψη τους ετήσιους προϋπολογισμούς. Το αρχικό μοντέλο δύο σταδίων γραμμικού



προγραμματισμού έχει τα δικά του πλεονεκτήματα όσον αφορά την απλότητα και την υπολογιστική αποδοτικότητα. Το προτεινόμενο μοντέλο ενιαίας φάσης IP, αν και πιο σύνθετο, θεωρείται πιο ισχυρό, παρόλο που τα αποτελέσματα δείχνουν μόνο οριακές βελτιώσεις.

Στη μελέτη των **Mathew et al. (2012)** αναπτύχθηκε ένα μοντέλο βελτιστοποίησης για την κατανομή των πόρων μεταξύ των διαφόρων προγραμμάτων βελτίωσης του στόλου εντός των περιορισμών του προϋπολογισμού κατά την περίοδο προγραμματισμού. Αυτό επιτυγχάνεται με την ελαχιστοποίηση του καθαρού τρέχοντος κόστους (Net Present Cost) της επένδυσης εντός του περιορισμού ενός ελάχιστου επιπέδου ποιότητας του στόλου που εκφράζεται ως υποκατάστατο της υπόλοιπης ζωής του στόλου. Ο ακέραιος προγραμματισμός χρησιμοποιείται για την επίλυση του διαμορφωμένου προβλήματος βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας αλγόριθμο επέκτασης και οριοθέτησης (branch and bound algorithm). Η διατύπωση και η εφαρμογή του μοντέλου αποδεικνύονται με μια πραγματική μελέτη περίπτωσης οργανισμού αστικών συγκοινωνιών. Παρατηρείται ότι η ελαχιστοποίηση του NPC παρέχει ένα ρεαλιστικό τρόπο για την κατανομή των πόρων μεταξύ των διαφόρων επιλογών προγράμματος του οργανισμού αστικών συγκοινωνιών διατηρώντας παράλληλα ένα επιθυμητό επίπεδο ποιότητας. Το προτεινόμενο μοντέλο είναι γενικευμένο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο κατανομής πόρων για τη διαχείριση του στόλου οχημάτων από οποιοδήποτε οργανισμό αστικών συγκοινωνιών. Το μοντέλο που προτείνεται σε αυτό το έγγραφο είναι το αποτέλεσμα συνεχούς έρευνας με θέμα την κατανομή των πόρων μεταξύ των διαφόρων επιλογών βελτίωσης της ζωής του στόλου (αποκατάσταση, ανακατασκευή ή αντικατάσταση) μεταξύ διαφόρων συστατικών φορέων κατά τη διάρκεια μίας περιόδου προγραμματισμού με δίκαιο τρόπο. Ο στόχος του μοντέλου βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης, εκφρασμένο ως NPC, με τη συνολική μέση σταθμισμένη μέση υπολειπόμενη ζωή (Total System Weighted Average Remaining Life), και ο προϋπολογισμός ως κύριοι περιορισμοί. Η προσέγγιση ελαχιστοποίησης του κόστους δεν πρέπει να θεωρείται κατώτερη ή ανώτερη από την προηγούμενη, (μεγιστοποίηση TSWARL (Mathew et al., 2010)), αλλά απλώς ως συμπληρωματικό μέσο για την κατανομή πόρων για επενδύσεις και διατήρηση του στόλου οχημάτων. Η θεμελιώδης διαφορά μεταξύ των δύο προσεγγίσεων είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους (NPC) σε αντίθεση με τη μεγιστοποίηση της ποιότητας του στόλου (TSWARL). Η πρωταρχική ώθηση για αυτό το μοντέλο είναι η αντίληψη ότι το κόστος προσδιορίζεται ευκολότερα ως εργαλείο λήψης αποφάσεων σε σύγκριση με την ποιότητα που συχνά θεωρείται κάπως αφηρημένη. Επειδή το NPC επηρεάζεται από το χρόνο της επένδυσης κατά την περίοδο προγραμματισμού, εισάγεται ένας πρόσθετος βαθμός πολυπλοκότητας στον αλγόριθμο μέσω της ενσωμάτωσης παραγόντων ενδιαφέροντος.

**O Lund (1988)** πρότεινε ένα μοντέλο για τον καθορισμό των βέλτιστων πολιτικών αντικατάστασης εξοπλισμού. Ο στόχος αυτού του μοντέλου κόστους αντικατάστασης είναι να αξιολογηθεί το κόστος του καθορισμού της κατάλληλης πολιτικής για ένα μη

ομοιογενή στόλο λεωφορείων πετρελαίου μέσω αντικατάστασης μεμονωμένων οχημάτων. Το μοντέλο εφαρμόστηκε για να ελαχιστοποιήσει το συνολικό προεξοφλητικό κόστος των εργασιών και αντικαταστάσεων στο μήκος του ορίζοντα σχεδιασμού του μοντέλου για τρεις διαφορετικές διαμορφώσεις στόλου λεωφορείων.

Οι **Jones, Zydiak και Hopp (1991)** δήλωσαν ότι το αυξανόμενο κόστος συντήρησης υποκινεί αντικαταστάσεις και ένα σταθερό κόστος αντικατάστασης παρέχει κίνητρο για την αντικατάσταση μηχανών της ίδιας ηλικίας σε ομάδες. Οι συγγραφείς ασχολήθηκαν με το παράλληλο πρόβλημα αντικατάστασης μηχανών και επαλήθευσαν έναν χρήσιμο κανόνα "όχι διαχωρισμός". Ο κανόνας δηλώνει ότι ποτέ δεν είναι βέλτιστο να χωριστεί ένα σύμπλεγμα μηχανών παρόμοιων ηλικιών. Ο δυναμικός προγραμματισμός χρησιμοποιήθηκε για τη διατύπωση αυτού του προβλήματος και ο γραμμικός προγραμματισμός χρησιμοποιήθηκε για την επίλυσή του.

Οι **Tang et al. (1993)** απέδειξαν τον κανόνα ότι για οποιαδήποτε περίοδο, πεπερασμένη ή άπειρη, μια βέλτιστη πολιτική είναι να διατηρηθούν ή να αντικατασταθούν όλα τα μηχανήματα ανεξάρτητα από την ηλικία.

Οι **Karabakal, Lohmann and Bean (1994)** παρουσίασαν στη μελέτη τους μια παράλληλη (ή ομαδική) αντικατάσταση υπό περιορισμούς κεφαλαίου. Ο μεμονωμένος τύπος αντικατάστασης πολλαπλών μονάδων περιλαμβάνει περιορισμούς του προϋπολογισμού, ντετερμινιστικές υποθέσεις και έναν ορίζοντα πεπερασμένου προγραμματισμού. Το πρόβλημα είναι διατυπωμένο ως μηδέν-ένα (0-1) ακέραιου προγραμματισμού και ένας αλγόριθμος διακλάδωσης και οριοθέτησης (branch and bound algorithm) με βάση την εξίσωση του Langrange αναπτύσσεται για την επίλυση του προβλήματος.

Ο **Hartman (1996)** ανέπτυξε πολλαπλές επιλογές αγοράς, μίσθωσης και ανακατασκευής, σε παράλληλη επανατοποθέτηση υπό περιορισμούς ζήτησης και διανομής. Στο πρόβλημα αντικατάστασης οι πολλαπλές μονάδες ομοιογενούς στόλου συνδυάζονται με πεπερασμένο ορίζοντα και καθοριστικές παραμέτρους. Στη συνέχεια αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε στο στόλο ένα μοντέλο ακέραιου προγραμματισμού. Το μοντέλο αντικατάστασης είχε εφαρμογή σε στόλο οχημάτων σταθερής τροχιάς. Έπειτα, η συγκεκριμένη ανάλυση επεκτάθηκε και σε μεγαλύτερους ετερογενείς στόλους.

Οι **Vemuganti, Oblak και Aggarwal (1989)** ασχολήθηκαν με ένα μοντέλο ελάχιστου κόστους ροής με βάση το δίκτυο για τον καθορισμό της βέλτιστης πολιτικής αντικατάστασης. Διάφορα μοντέλα παρουσιάζονται για διαφορετικές πολιτικές. Αυτά είναι: (1) αντικατάσταση ενός μόνο οχήματος δεδομένου στόλου σταθερού μεγέθους που αποτελείται από ένα μόνο τύπο οχημάτων διαφόρων ηλικιών, (2) στόλο οχημάτων διαφόρων τύπων και ηλικιών χωρίς περιορισμούς, (3) στόλο οχημάτων διαφόρων τύπων και ηλικιών που ενσωματώνουν δημοσιονομικούς περιορισμούς σε ένα πεπερασμένο

χρονικό ορίζοντα σχεδιασμού και (4) παραλλαγές του μεγέθους του στόλου. Ο σχεδιασμός του μοντέλου θεωρεί ότι τα οχήματα είναι ομογενή.

Οι **Jardine et al (1976)** χρησιμοποίησαν την προσέγγιση ενός ετήσιου ορίου κόστους συντήρησης για να θέσουν αποφάσεις αντικατάστασης. Κάθε χρόνο, η απόφαση να αντικατασταθεί ή όχι ένα όχημα πραγματοποιείται συγκρίνοντας τον εκτιμώμενο λογαριασμό συντήρησης για το επόμενο έτος με το ετήσιο όριο κόστους συντήρησης. Το κόστος συντήρησης ενός οχήματος συγκεκριμένης ηλικίας θεωρείται ότι έχει την κατανομή Weibull και καθορίζεται το ανώτατο όριο κόστους συντήρησης που ελαχιστοποιεί το αναμενόμενο συνολικό κόστος συντήρησης και αντικατάστασης οχήματος σε καθορισμένο χρονικό ορίζοντα. Επιπλέον, οι συντάκτες έδειξαν πώς να λάβουν υπόψη τις επιπτώσεις των φορολογικών ελαφρύνσεων σε αποφάσεις αντικατάστασης.

Οι **Christer και Goodbody (1980)** αντιμετώπισαν το πρόβλημα της αντικατάστασης του εξοπλισμού σε μια ασταθή οικονομία. Πράγματι, η αντικατάσταση μονάδων σε ένα στόλο ανυψωτικών οχημάτων, πρέπει να αντιμετωπισθεί με διαφορετικό τρόπο από τον παραδοσιακό κατά τη διάρκεια μιας περιόδου πληθωρισμού και μιας αβέβαιης οικονομίας. Προφανώς, οι σκέψεις αυτές πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επεξεργασία ενός μοντέλου συντήρησης.

Εκτός αυτού, υπάρχουν δύο μελέτες που διεξήχθησαν από τους **Rueda (1983) και Miller (1986)**, αφιερωμένες στη σύγκριση δημοφιλών μοντέλων που υποβλήθηκαν σε πραγματικά δεδομένα. Ο στόχος του πρώτου είναι να βρεθούν οι βέλτιστοι χρόνοι αντικατάστασης ενός λεωφορείου και του δεύτερου οι βέλτιστη περίοδος συντήρησης των εξαρτημάτων ενός λεωφορείου.

### 2.2.9 Μελέτες σύγκρισης ομοιογενών και ετερογενών μοντέλων βελτιστοποίησης

Υπάρχει ένα μεγάλο μέρος της βιβλιογραφίας που ασχολείται με τα μοντέλα βελτιστοποίησης αντικατάστασης οχημάτων στον τομέα της έρευνας των επιχειρήσεων. Αυτά τα μοντέλα μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το αν τα λεωφορεία ενός στόλου είναι ομοιογενή ή ετερογενή. Στα ομοιογενή μοντέλα, ο στόχος είναι να βρεθεί η καλύτερη ηλικία ταξινόμησης για ένα σύνολο πανομοιότυπων οχημάτων. Με άλλα λόγια, τα λεωφορεία του ίδιου τύπου και ηλικίας πρέπει να αντικατασταθούν μαζί. Αυτά τα μοντέλα συνήθως επιλύονται χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση δυναμικού προγραμματισμού (**Bellman 1955, Oakford et al., 1984, Bean κ.ά., 1984, Bean κ.ά., 1994, Hartman 2001, Hartman and Murphy 2006**).

Τα ετερογενή μοντέλα είναι πιο κατάλληλα όταν πολλαπλοί στόλοι λεωφορείων πρέπει να βελτιστοποιηθούν ταυτόχρονα ή όταν χρειάζονται περιορισμοί για τον προϋπολογισμό. Αυτά τα μοντέλα είναι σε θέση να λύσουν περισσότερα πρακτικά

προβλήματα, αλλά οι μεταβλητές εισόδου είναι συνήθως ντετερμινιστικές. Τα стоχαστικά ετερογενή μοντέλα είναι δύσκολο να λυθούν. Τα περισσότερα ετερογενή μοντέλα χρησιμοποιούν ακέραιο προγραμματισμό (Integer Programming) (Simms et al., 1984; Karabakal et al. 1994; Hartman 1999, 2000, 2004). Με πρόσθετες υποθέσεις η προσέγγιση δυναμικού προγραμματισμού μπορεί να εφαρμοστεί σε ετερογενή προβλήματα (Jones et al., 1991). Κανένα από αυτά τα θεωρητικά μοντέλα που αναφέρονται στην παρούσα παράγραφο δεν αφορά τα πραγματικά δεδομένα ενός στόλου.

Οι Fan et al. (2012) ανέπτυξαν ένα πλαίσιο βελτιστοποίησης του στόλου με χρήση της προσέγγισης του δυναμικού προγραμματισμού. Ωστόσο, η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση των ετερογενών οχημάτων και η ανάλυση ευαισθησίας των εισαχθέντων μεταβλητών δεν εξετάστηκε.

Οι Figliozzi et al. (2011) και οι Feng και Figliozzi (2013) υιοθέτησαν μοντέλα ακέραιου προγραμματισμού για να μελετήσουν ένα στόλο ετερογενών επιβατικών αυτοκινήτων και φορτηγών μεταφοράς με πραγματικά δεδομένα. Οι επιπτώσεις της πολιτικής, της αγοράς, της χρήσης, των εκπομπών και των τεχνολογικών παραγόντων μελετήθηκαν με ανάλυση σεναρίων και ανάλυση ελαστικότητας.

Οι Boudart και Figliozzi (2012) μελέτησαν πώς οι οικονομικοί και τεχνολογικοί παράγοντες επηρεάζουν τη βέλτιστη ηλικία αντικατάστασης ενός λεωφορείου.

Οι Keles και Hartman (2004) υιοθέτησαν ένα πρότυπο ακέραιου προγραμματισμού σε ένα πρόβλημα αντικατάστασης στόλου που αποτελείται από πολλούς τύπους λεωφορείων.

### 2.3 Κριτική αξιολόγηση

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Καταβλήθηκε προσπάθεια παράθεσης και ανάλυσης διαφόρων ερευνών βέλτιστης κατανομής πόρων για την συντήρηση διάφορων ειδών στόλων οχημάτων. Από την σύνθεση των βασικών τους σημείων εξάγονται οι παρακάτω παρατηρήσεις:

Έχουν πραγματοποιηθεί ελάχιστες μελέτες για την αναβάθμιση των λεωφορείων του Οργανισμού Αστικών Συγκοινωνιών Αθηνών.

Η έγκαιρη αντικατάσταση των λεωφορείων στο στόλο είναι ένα από τα βασικά προγράμματα που χρησιμεύουν ως ραχοκοκαλιά ενός επιτυχημένου συστήματος μεταφορών. Τα λεωφορεία αποτελούν το πιο πολύτιμο στοιχείο του συστήματος διαμετακόμισης, επειδή η καλή εξυπηρέτηση των πελατών εξαρτάται από την κατάσταση του στόλου.

Η **μέθοδος του γραμμικού προγραμματισμού** που χρησιμοποιήθηκε σε κάποιες μελέτες παρουσιάζει το πλεονέκτημα της καλύτερης δυνατής χρήσης των διαθέσιμων παραγωγικών πόρων, ενώ βασικό του μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι εφαρμόζεται μόνο σε προβλήματα, όπου οι περιορισμοί και η αντικειμενική συνάρτηση είναι γραμμικοί όροι.

Η **μέθοδος του ακέραιου προγραμματισμού** προέρχεται από εκείνη του γραμμικού, ενώ προστίθενται και κάποιοι επιπλέον περιορισμοί που απαιτούν μέρος από τις μεταβλητές να είναι ακέραιες. Ωστόσο, ο επιπλέον αυτός περιορισμός καθιστά ορισμένες φορές πιο δύσκολη την επίλυση των εκάστοτε μοντέλων.

Η **μέθοδος του δυναμικού προγραμματισμού** είναι μια υπολογιστική μέθοδος η οποία εφαρμόζεται όταν πρόκειται να ληφθεί μια σύνθετη απόφαση η οποία προκύπτει από τη σύνθεση επιμέρους αποφάσεων που αλληλεξαρτώνται. Η επίλυση της μεθόδου βασίζεται στη διασύνδεση των επιμέρους αποφάσεων με κατάλληλη αναδρομική σχέση ώστε η

σύνθεση των επιμέρους αποφάσεων να δίνει την τελικά ζητούμενη απόφαση. Η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει μεγαλύτερη ευελιξία από άλλες μεθόδους, το τίμημα όμως για την ευελιξία αυτή είναι συνήθως το αυξημένο υπολογιστικό κόστος.

Συνοπτικά, στη βιβλιογραφία υπάρχει ένα ισχυρό σύνολο από γραμμικές και μη γραμμικές προσεγγίσεις για προβλήματα συντήρησης-επισκευής και αποκατάστασης. Κάθε ένα από αυτά έχει κατασκευαστεί με στόχο την πρόβλεψη της μελλοντικής κατάστασης του εκάστοτε στόλου οχημάτων, αφού εφαρμοστεί η συντήρηση. Κάθε μία από τις παραπάνω μελέτες έχει βασιστεί σε μία σειρά από παραδοχές και συγκεκριμένα διαθέσιμα δεδομένα, πληροφορίες και γνώση.

Τα κόστη λεωφορείων αποδίδονται σε πολλούς παράγοντες κόστους: αγορές κεφαλαίου, λειτουργία οχημάτων, καύσιμα, γενική διοίκηση, συντήρηση οχημάτων, συντήρηση εγκαταστάσεων και άλλα, οι οποίοι έχουν ποσοστιαία συνεισφορά στη διαμόρφωση του συνολικού κόστους λεωφορείων.

Υπάρχει ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση του προβλήματος της συντήρησης και αναβάθμισης των στόλων λεωφορείων που ανήκουν στον Ο.Α.Σ.Α. και σε άλλους δημόσιους οργανισμούς που διαχειρίζονται στόλους λεωφορείων.

## Θεωρητικό υπόβαθρο βελτιστοποίησης

---

### 3.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο, επιδιώκεται η περιγραφή του θεωρητικού υποβάθρου πάνω στο οποίο θα βασιστεί η ανάλυση του αντικειμένου της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, δίνεται έμφαση στη σημασία του γραμμικού και ακέραιου προγραμματισμού για την επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια θα αναλυθεί ο τρόπος επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης της κατανομής πόρων για τη συντήρηση και αντικατάσταση στόλου λεωφορείων με τη βοήθεια του εργαλείου επίλυσης του Excel (Excel Solver).

### 3.2 Γραμμικός Προγραμματισμός

#### 3.2.1 Εισαγωγή

Ο γραμμικός προγραμματισμός είναι ένας από τους πιο εφαρμοσμένους κλάδους της επιστήμης των μαθηματικών με πληθώρα εφαρμογών στην επιστήμη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και ασχολείται με την επίλυση του γραμμικού μοντέλου στην Επιχειρησιακή Έρευνα. Για το σκοπό αυτό μελετάει τις ιδιότητες του γραμμικού προβλήματος, κατασκευάζει τρόπους επίλυσης και εξετάζει τρόπους εφαρμογής των αποτελεσμάτων στη λήψη πολύπλοκων αποφάσεων. Από την οικονομική σκοπιά, ο Γραμμικός Προγραμματισμός είναι μια τεχνική που ασχολείται με το πρόβλημα της **βέλτιστης κατανομής των περιορισμένων πόρων** ενός συστήματος σε ανταγωνιζόμενες δραστηριότητες κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Ακόμη, χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων ενέργειας, διοίκησης προσωπικού, προστασίας του περιβάλλοντος, καθώς επίσης και προβλημάτων που αφορούν την ανάθεση πεπερασμένων πόρων σε ανταγωνιστικές απαιτήσεις (π.χ. κατανομή εργατικού δυναμικού, πρώτων υλών και τεχνολογικού εξοπλισμού).

Η αρχική μαθηματική διατύπωση του προβλήματος, καθώς και μια συστηματική διαδικασία λύσης του, η μέθοδος Simplex, οφείλεται στον G. B. Dantzig στα 1947. Νωρίτερα διάφορα προβλήματα τύπου Γραμμικού Προγραμματισμού. Τα

σημαντικότερα από αυτά αφορούν το πρόβλημα μεταφοράς (Hitchcock 1941, Koopmans 1949) και το πρόβλημα της δίαιτας (Stigler 1945). Ο Dantzig ήταν όμως ο άνθρωπος που κατασκεύασε το γενικό πλαίσιο και ταυτόχρονα υπέδειξε τη μέθοδο επίλυσής του.

Θεωρείται ως μια από τις πιο σπουδαίες μαθηματικές ανακαλύψεις των μέσων χρόνων του εικοστού αιώνα και στις μέρες μας αποτελεί ένα μοντέλο ευρείας χρήσης για καθημερινά ζητήματα των περισσότερων μεσαίου και μεγάλου μεγέθους εμπορικών-βιομηχανικών εταιρειών.

### 3.2.2 Τι είναι ο Γραμμικός Προγραμματισμός

Τα γραμμικά μοντέλα επιδιώκουν να **βελτιστοποιήσουν** (ελαχιστοποιήσουν ή μεγιστοποιήσουν) μια γραμμική συνάρτηση κάτω από κάποιους γραμμικούς περιορισμούς. Όπως υποδηλώνει το όνομά του, το μοντέλο του **Γραμμικού Προγραμματισμού** αποτελείται από γραμμικές συναρτήσεις και περιορισμούς. Ο όρος «**Γραμμικός**» χρησιμοποιείται για να περιγράψει το γεγονός ότι η σχέση μεταξύ δύο ή περισσότερων μεταβλητών είναι γραμμική σχέση.

Επίσης, συχνά χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του βέλτιστου σχεδίου λειτουργίας μιας παραγωγικής διαδικασίας. Δηλαδή προβλήματα καθορισμού των ποσοτήτων που πρέπει να παραχθούν από κάθε προϊόν σε σχέση με ότι βρίσκεται στις αποθήκες με σκοπό τη μεγιστοποίηση του κέρδους.

Ο όρος «**προγραμματισμός**» δεν έχει την έννοια του «προγραμματισμού ηλεκτρονικών υπολογιστών», αλλά αυτήν του «σχεδιασμού». Ο **Γραμμικός Προγραμματισμός** ασχολείται με τη σχεδίαση των δραστηριοτήτων του συστήματος που περιγράφει για να προκύψει το άριστο αποτέλεσμα. Σκοπός, δηλαδή, του Γραμμικού Προγραμματισμού είναι από όλους τους συνδυασμούς των πηγών να επιλέξουμε εκείνον που μεγιστοποιεί το κέρδος ή ελαχιστοποιεί το κόστος μιας δραστηριότητας.

Ο Γραμμικός Προγραμματισμός παρουσιάζει επίσης ενδιαφέρον για τη θεωρητική πληροφορική. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση και την επίλυση πολλών συνδυαστικών προβλημάτων τα οποία εκ πρώτης όψεως δεν σχετίζονται με το γραμμικό μοντέλο.



### 3.2.3 Μαθηματικό μοντέλο Γραμμικού Προγραμματισμού

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας του γραμμικού προγραμματισμού για την επίλυση ενός επιχειρησιακού προβλήματος απαιτεί τη δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου. Με τη δημιουργία του μοντέλου είναι δυνατή η καλύτερη επεξεργασία του προβλήματος και των περιορισμών και η καλύτερη και πιο ακριβής επίλυση αυτού:

$$\max/ \min(c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + \dots + c_n \cdot x_n) \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + \dots + a_{1n} \cdot x_n & [\leq, =, \geq] b_1 \\ a_{21} \cdot x_1 + a_{22} \cdot x_2 + \dots + a_{2n} \cdot x_n & [\leq, =, \geq] b_2 \\ \dots & \dots \\ a_{m1} \cdot x_1 + a_{m2} \cdot x_2 + \dots + a_{mn} \cdot x_n & [\leq, =, \geq] b_m \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + \dots + a_{1n} \cdot x_n [\leq, =, \geq] b_1$$

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$$

Σε γενικές γραμμές τρία είναι τα βήματα για τη διατύπωση κάποιου τυχαίου προβλήματος ως μαθηματικό μοντέλο:

- Προσδιορισμός των μεταβλητών απόφασης
- Διατύπωση της αντικειμενικής συνάρτησης
- Διατύπωση των περιορισμών

Ως πρώτο βήμα θα πρέπει να οριστούν οι μεταβλητές-άγνωστοι του προβλήματος  $X_j$  ( $j=1,2,\dots,n$ ) που ονομάζονται **μεταβλητές απόφασης (decision variables)**. Το επόμενο μας βήμα είναι να διατυπωθεί μια σχέση που να συνδέει τις μεταβλητές με το αποτέλεσμα προς βελτιστοποίηση. Η συνάρτηση αυτή ονομάζεται **αντικειμενική συνάρτηση (objective function)** που η μορφή της Maximize  $f(x)$  ή Minimize  $f(x)$  και οι τιμές της ονομάζονται αντικειμενικές τιμές (objective values). Στην ορολογία του γραμμικού προγραμματισμού οι ανισότητες που πρέπει να ικανοποιούν οι μεταβλητές απόφασης, ονομάζονται **περιορισμοί (constraints)**. Η μαθηματική μορφή ενός περιορισμού είναι  $f(x) \geq b$  ή  $f(x) \leq b$  ή  $f(x) = b$  ανάλογα με τον τύπο του προβλήματος. Ένα γραμμικό πρόβλημα στο οποίο ζητείται να βρεθεί το ελάχιστο ονομάζεται **πρόβλημα ελαχιστοποίησης (minimization problem)**, ενώ το πρόβλημα στο οποίο ζητείται το

Formatted: Greek  
Formatted: Greek  
Formatted: Greek

μέγιστο ονομάζεται πρόβλημα μεγιστοποίησης (**maximization problem**). Από μαθηματική άποψη δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά μεταξύ των δυο προβλημάτων. Λόγω της ταυτότητας  $\min\{f(x)\} = -\max\{-f(x)\}$  κάθε πρόβλημα ελαχιστοποίησης μπορεί να μετατραπεί σε ένα ισοδύναμο πρόβλημα μεγιστοποίησης και αντιστρόφως.

Για την διατύπωση του θεωρητικού υποβάθρου της Simplex το μοντέλο μετατρέπεται, ανάλογα, στην τυπική (standard) ή στην κανονική (canonical) μορφή.

**Πίνακας 3.2.1:** Σύγκριση των δύο μορφών Γραμμικού Προγραμματισμού

|                | Πρόβλημα Ελαχιστοποίησης   | Πρόβλημα Μεγιστοποίησης  |
|----------------|--|--|
| Τυπική Μορφή   | $\min(c_i, x_i)$ $\sum_{i=1}^n a_{ij}x_i = b_j, i = 1, \dots, m$ $x_i \geq 0, i = 1, \dots, n$ | $\max(c_i, x_i)$ $\sum_{i=1}^n a_{ij}x_i = b_j, i = 1, \dots, m$ $x_i \geq 0, i = 1, \dots, n$ |
| Κανονική Μορφή | $\min(c_i, x_i)$ $\sum_{i=1}^n a_{ij} = b_j, i = 1, \dots, m$ $x_i \geq 0, i = 1, \dots, n$    | $\max(c_i, x_i)$ $\sum_{i=1}^n a_{ij} = b_j, i = 1, \dots, m$ $x_i \geq 0, i = 1, \dots, n$    |

### 3.2.4 Προϋποθέσεις Γραμμικού Προγραμματισμού

Κάθε μαθηματική τεχνική μοντελοποίησης λειτουργεί κάτω από ορισμένες βασικές υποθέσεις και ο γραμμικός προγραμματισμός δεν αποτελεί εξαίρεση. Υπάρχουν τέσσερα βασικά αξιώματα που διασφαλίζουν ότι μια πραγματική κατάσταση μπορεί να αναπαρασταθεί ως πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού:

**Βεβαιότητα-Προσδιοριστικότητα:** Μία απαραίτητη προϋπόθεση για να μπορεί να εφαρμοσθεί η θεωρία του Γραμμικού Προγραμματισμού σε κάποιο πρόβλημα ορίζει πως οι διάφορες παράμετροι του προβλήματος πρέπει να είναι γνωστές και μάλιστα με απόλυτη βεβαιότητα. Το πρότυπο του Γραμμικού Προγραμματισμού προσομοιώνει καταστάσεις που συνεπάγονται λήψη αποφάσεων με βαθμό αβεβαιότητας (uncertainty). Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι οι παράμετροι του προτύπου δεν έχουν σταθερή τιμή. Πολλές φορές η προϋπόθεση αυτή δεν ικανοποιείται. Στις περιπτώσεις αυτές βοηθά η ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis), η οποία παρουσιάζει τις επιπτώσεις αλλαγής της τιμής μιας παραμέτρου στη λύση του προβλήματος. Συχνά ο βαθμός αβεβαιότητας είναι μεγάλος, έτσι ώστε καθίσταται αναγκαίο να θεωρηθεί ότι οι μεταβλητές ακολουθούν κατανομή πιθανότητας (Στοχαστικός Προγραμματισμός)

**Αναλογικότητα:** Η αντικειμενική συνάρτηση ενός προβλήματος Γραμμικού Προγραμματισμού πρέπει να είναι γραμμική συνάρτηση των μεταβλητών απόφασης. Αυτό έχει ως επιπτώσεις ότι συμβολή κάθε μεταβλητής απόφασης στην αντικειμενική συνάρτηση είναι αναλογική της τιμής της μεταβλητής και ανεξάρτητη από τις τιμές των υπόλοιπων μεταβλητών απόφασης. Τα παραπάνω προϋποθέτουν ότι όλες οι συναρτήσεις πρέπει να λαμβάνουν συνεχείς τιμές στην περιοχή εφικτότητας. Αν οι μεταβλητές λαμβάνουν μόνο ακέραιες ή διακριτές τιμές ή αν η συνάρτηση κόστους κάποιας μεταβλητής δεν είναι συνεχής, τότε η επίλυση δεν μπορεί να γίνει με Γραμμικό Προγραμματισμό. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται χρήση ακέραιου, χωριζόμενου προγραμματισμού ή άλλης μεθοδολογίας. Έτσι, προκύπτει η Προϋπόθεση Αναλογικότητας του Γραμμικού Προγραμματισμού (Proportionality Assumption of Linear Programming), όπου η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι το άθροισμα των ατομικών συνεισφορών κάθε μεταβλητής, καθώς και ότι το αριστερό μέρος κάθε εξίσωσης ή ανισότητας περιορισμού ισούται με το άθροισμα των συμβολών των μεταβλητών.

**Προσθετικότητα:** Προϋποθέτει ότι η αντικειμενική συνάρτηση είναι το άθροισμα των συνεισφορών των διαφόρων μεταβλητών. Στην περίπτωση που υπάρχουν αλληλεπιδράσεις μεταξύ δραστηριοτήτων που τροποποιούν το κέρδος από κάθε δραστηριότητα ή την ολική χρήση των πόρων, οι συναρτήσεις παύουν να είναι γραμμικές. Η ιδιότητα της προσθετικότητας ορίζει ότι π.χ. το κέρδος από τις δραστηριότητες  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  ισούται με το άθροισμα των επί μέρους κερδών  $F(x_1), F(x_2), \dots, F(x_n)$ . Το αντίστροφο ισχύει και για τους διάφορους περιορισμούς.

**Διαιρετότητα:** Εκφράζει την ικανότητα κατανομής των δραστηριοτήτων σε ποσοστιαία επίπεδα έτσι ώστε να είναι παραδεκτές μη ακέραιες τιμές (κλασματικές) των μεταβλητών απόφασης. Η γενική έκφραση της αντικειμενικής συνάρτησης του γραμμικού προγραμματισμού θεωρεί ότι όλες οι μεταβλητές είναι συνεχείς και διαιρετές γεγονός που συνεπάγεται ότι όλα τα επίπεδα δραστηριοτήτων και όλες οι χρήσεις πόρων μπορούν να πάρουν κλασματικές ή ακέραιες τιμές.

- Αν και οι εφαρμογές του γραμμικού προγραμματισμού είναι ποικίλες, εν τούτοις όλα τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού έχουν μερικά κοινά χαρακτηριστικά. Αυτά είναι τα παρακάτω:
- Σε όλα τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού αποβλέπουμε στη μεγιστοποίηση του κέρδους ή ελαχιστοποίηση του κόστους αντίστοιχα. Το κέρδος ή το κόστος δίνεται από μια γραμμική συνάρτηση των μεταβλητών του προβλήματος η οποία καλείται γραμμική συνάρτηση.

- Σε όλα τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού υπάρχουν περιορισμοί, οι οποίοι περιορίζουν τη δυνατότητα της απεριόριστης αύξησης της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης. Όταν πρόκειται για ελαχιστοποίηση κόστους οι περιορισμοί του προβλήματος περιορίζουν το βαθμό στον οποίο η ελάττωση του κόστους είναι εφικτή.
- Σε όλα τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού υπάρχουν εναλλακτικές λύσεις, εκ των οποίων θα επιλεγεί η βέλτιστη. Βασικός σκοπός του γραμμικού προγραμματισμού είναι η επιλογή της βέλτιστης λύσης.

### 3.2.5 Είδη λύσεων Γραμμικού Προγραμματισμού

**Λύση (solution)** ενός προβλήματος γενικά, καλούμε κάθε διάνυσμα  $x$  τιμών των μεταβλητών απόφασης, ανεξάρτητα αν ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί ή αν έχουμε 'επιθυμητές' ή όχι τιμές. Για αυτό το λόγο θα πρέπει να ορίσουμε ακριβέστερα τον όρο λύση στα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού. Οπότε έχουμε τα εξής είδη λύσεων:

- Εφικτή λύση (feasible solution):

Είναι η λύση (ή ένα διάνυσμα  $x$ ) για την οποία ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί του προβλήματος, συμπεριλαμβανομένου και της μη αρνητικότητας.

- Βέλτιστη εφικτή λύση (optimal feasible solution)

Είναι εκείνη η εφικτή λύση που επιπλέον βελτιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Η λύση αυτή είναι ουσιαστικά αυτή που αναζητείται και έτσι (αν υπάρχει) έχει επιτευχθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό ο στόχος που έχει τεθεί.

- Εφικτή λύση ακραίου σημείου (corner-point feasible solution)

Είναι κάθε δυνατή λύση που δεν κείται σε ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει δύο άλλες δυνατές λύσεις, δηλαδή κάθε λύση που βρίσκεται σε κορυφή ή γωνία του χώρου εφικτότητας.

- Γειτονικές ακραίες εφικτές λύσεις (adjacent corner-point feasible solutions)

Καλούνται δύο ακραίες εφικτές λύσεις, εφόσον η ευθεία που τις ενώνει αποτελεί εξίσωση ορίου για το χώρο εφικτότητας.

- Επαυξημένη λύση (augmented solution)

Formatted: List Paragraph, Bulleted + Level: 1 + Aligned at: 1,59 cm + Indent at: 2,22 cm

Formatted: English (United States)

Formatted: List Paragraph, Bulleted + Level: 1 + Aligned at: 1,59 cm + Indent at: 2,22 cm

Formatted: English (United States)

Formatted: English (United States)

Formatted: List Paragraph, Bulleted + Level: 1 + Aligned at: 1,59 cm + Indent at: 2,22 cm

Formatted: English (United States)

Formatted: English (United States)

Formatted: English (United States)

Formatted: English (United States)

Formatted: English (United States)

Formatted: English (United States)

Formatted: English (United States)

Formatted: English (United States)

Formatted: English (United States)

Formatted: English (United States)

Formatted: English (United States)

Formatted: English (United States)

Formatted: English (United States)

Formatted: English (United States)

Formatted: English (United States)

Formatted: English (United States)

Formatted: English (United States)

Formatted: List Paragraph, Bulleted + Level: 1 + Aligned at: 1,59 cm + Indent at: 2,22 cm

Formatted: List Paragraph, Bulleted + Level: 1 + Aligned at: 1,59 cm + Indent at: 2,22 cm

Είναι η λύση του προβλήματος Γ.Π., το οποίο έχει κατασκευαστεί στην πρότυπη μορφή του, δηλαδή έχει επαυξηθεί με μεταβλητές έτσι ώστε οι περιορισμοί να εκφράζονται με ισότητες. Η λύση του επαυξημένου προβλήματος καλείται επαυξημένη λύση.

- Βασική λύση (basic solution)

Ονομάζεται κάθε ακραία επαυξημένη λύση, η οποία μπορεί να είναι εφικτή ή μη.

- Βασική εφικτή λύση (basic feasible solution)

Είναι η βασική λύση της οποίας οι  $m$  βασικές μεταβλητές είναι μη αρνητικές ( $\geq 0$ ). Μία βασική εφικτή λύση θεωρείται εκφυλισμένη (degenerated), αν κάποιες από τις  $m$  βασικές μεταβλητές έχουν μηδενική τιμή.

- Εξισώσεις ορίων (boundary equations)

Οι εξισώσεις ορίων ορίζουν ένα υπερπίεδο ή ένα  $n$ -διάστατο γεωμετρικό σχήμα που είναι το ανάλογο μιας ευθείας των δύο διαστάσεων ή ενός επιπέδου των τριών διαστάσεων και κατασκευάζονται από τις ανισώσεις των περιορισμών, αν αντικατασταθούν  $\leq$  ή  $\geq$  με ισότητες. Προφανώς το όριο της εφικτής περιοχής ενός προβλήματος Γραμμικού Προγραμματισμού αποτελείται από τις εφικτές λύσεις που ικανοποιούν μία ή περισσότερες εξισώσεις ορίων, ενώ η βέλτιστη λύση βρίσκεται μεταξύ αυτών των εξισώσεων.

- Μη-εφικτή λύση (infeasible solution)

Μια μη-εφικτή λύση δεν ικανοποιεί τουλάχιστον έναν περιορισμό από αυτούς που έχουν τεθεί. Γενικά, είναι αρκετά πιθανό για ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού να έχει μη εφικτές λύσεις.

Formatted: List Paragraph, Bulleted + Level: 1 +  
Aligned at: 1,59 cm + Indent at: 2,22 cm

Formatted: List Paragraph, Bulleted + Level: 1 +  
Aligned at: 1,59 cm + Indent at: 2,22 cm

Formatted: List Paragraph, Bulleted + Level: 1 +  
Aligned at: 1,59 cm + Indent at: 2,22 cm

Formatted: List Paragraph, Bulleted + Level: 1 +  
Aligned at: 1,59 cm + Indent at: 2,22 cm

Formatted: English (United States)

Formatted: English (United States)

Formatted: English (United States)

### 3.3 Η μέθοδος Simplex

Η μέθοδος Simplex είναι η γενική διαδικασία επίλυσης των προβλημάτων του γραμμικού προγραμματισμού. Είναι μια πολύ αποτελεσματική μέθοδος, που χρησιμοποιείται για την επίλυση μεγάλων προβλημάτων στους σημερινούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Ειδικότερα, είναι ένας αλγόριθμος (algorithm). Ως αλγόριθμο θεωρούμε κάθε επαναληπτική διαδικασία για την επίλυση ενός προγράμματος, δηλαδή μια συστηματική διαδικασία που επαναλαμβάνεται μέχρι να βρεθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Κάθε φορά που επαναλαμβάνεται η διαδικασία ονομάζεται επανάληψη (iteration). Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει κανόνες για να αρχίσει η διαδικασία και κριτήρια που προσδιορίζουν πότε αυτή θα τελειώσει.

Συνεπώς, η μέθοδος Simplex είναι μια επαναληπτική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού μέχρις ότου επιτευχθεί μια βέλτιστη λύση. Βασίζεται στη συστηματική δημιουργία βασικών δυνατών λύσεων και στον έλεγχο της αριστότητάς τους. Με αυτή την επαναληπτική διαδικασία επιτυγχάνονται εφικτές λύσεις με έναν συστηματικό τρόπο. Η μέθοδος στηρίζεται σε δύο έννοιες. Στην έννοια της εφικτής λύσης και στην έννοια της άριστης λύσης. Επίσης βασίζεται και στην ιδιότητα ότι η άριστη λύση ενός προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού, αν υπάρχει, μπορεί πάντοτε να βρεθεί σε μια από τις βασικές εφικτές λύσεις.

Η μέθοδος Simplex εξετάζει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης μόνο στα ακραία σημεία της περιοχής των εφικτών λύσεων, με ένα συστηματικό αλγεβρικό τρόπο. Η διαδοχική εξέταση των ακραίων σημείων γίνεται με επαναληπτικό τρόπο, δηλαδή επαναλαμβάνεται το ίδιο σύνολο των διαδικασιών και αλγεβρικών πράξεων σε διαδοχικά βήματα έως ότου επιτευχθεί ο εντοπισμός της βέλτιστης λύσης. Κάθε βήμα της μεθόδου Simplex αντιστοιχεί στην επιλογή ενός ακραίου σημείου της περιοχής των εφικτών λύσεων. Σε κάθε νέο βήμα, το επόμενο ακραίο σημείο της περιοχής των εφικτών λύσεων επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης να αυξάνεται (ή αντίστοιχα μειώνεται αν η αντικειμενική συνάρτηση αφορά την ελαχιστοποίηση του κόστους) και επομένως σταδιακά προκύπτει η βέλτιστη/άριστη λύση.

Επομένως, στη μέθοδο Simplex το πρώτο στάδιο αποτελεί πάντοτε η εξεύρεση μιας βασικής εφικτής λύσης. Κατόπιν αυτή η λύση εξετάζεται για αριστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης και την επίδραση που έχει η εισαγωγή μιας μη βασικής μεταβλητής για την αντικατάσταση τουλάχιστον μιας από τις βασικές μεταβλητές που ήδη υπάρχει σαν λύση. Εάν σημειώνεται βελτίωση ή αντικατάσταση γίνεται πάντοτε με την εισαγωγή μόνο μιας μη βασικής μεταβλητής κάθε φορά, η οποία δίνει πάντοτε μια νέα εφικτή λύση.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί άλλο ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της μεθόδου, το οποίο είναι ότι για κάθε νέα λύση η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι τουλάχιστον το ίδιο βέλτιστη όσο και η προηγούμενη λύση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σε κάθε βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας να γίνεται καλύτερη προσέγγιση της λύσης. Τέλος, η μέθοδος καθορίζει που έχει βρεθεί η βέλτιστη λύση.

Εκτός από τον προσδιορισμό της βέλτιστης λύσης, δηλαδή της τιμές των μεταβλητών και το αντίστοιχο βέλτιστο κέρδος ή κόστος, η μέθοδος Simplex, παρέχει επίσης ένα πλήθος άλλων πληροφοριών οικονομικής φύσεως, οι οποίες δεν είναι δυνατό να παραχθούν με άλλο τρόπο.

Για να μπορέσουν να αναπτυχθούν οι βασικές ιδέες της μεθόδου στη λύση προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού, θα πρέπει να μελετηθεί πρώτα το γενικό πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού. Επιπλέον, το πρόβλημα πρέπει να είναι σε κανονική μορφή και, όπως προαναφέρθηκε, να είναι γνωστή μια (αρχική) μη εκφυλισμένη βασική

εφικτή λύση. Λύνοντας ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού είναι απαραίτητο να βρούμε την λύση του συστήματος γραμμικών εξισώσεων που συσχετίζονται με το πρόβλημα και το οποίο προκύπτει από τους περιορισμούς. Έτσι, εάν έχουμε ένα σύστημα δύο εξισώσεων με δύο αγνώστους είναι γνωστό ότι αυτό θα έχει μια μοναδική λύση. Για κάθε τιμή του  $x_1$  (ή του  $x_2$ ), υπάρχει μια αντίστοιχη τιμή  $x_2$  (ή του  $x_1$ ).

Εάν επιπλέον θεωρηθεί και η συνθήκη μη αρνητικότητας των μεταβλητών, δηλαδή  $x_1 \geq 0$ ,  $x_2 \geq 0$ , τότε περιορίζεται το πεδίο τιμών των μεταβλητών. Η συνθήκη της μη αρνητικότητας των μεταβλητών είναι μια σημαντική απαίτηση των προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού. Συστήματα στα οποία οι αγνώστοι είναι περισσότεροι από τις εξισώσεις ονομάζονται απροσδιόριστα συστήματα. Γενικά, τα απροσδιόριστα συστήματα μπορεί να μην έχουν λύση ή να έχουν άπειρες λύσεις.

### 3.4 Επίλυση προβλημάτων Γραμμικού Προγραμματισμού με τη βοήθεια υπολογιστικών πακέτων

Με στόχο την επίλυση προβλημάτων Γραμμικού Προγραμματισμού είναι διαθέσιμη μεγάλη ποικιλία λογισμικού, κατάλληλου όχι μόνο για μεγάλους υπολογιστές αλλά ακόμη και για προσωπικούς υπολογιστές. Τρία από τα σπουδαιότερα πακέτα είναι:

Ο 'επιλύτης' – **Solver**, ο οποίος βρίσκεται ενσωματωμένος στο φύλλο εργασίας του προγράμματος Excel, του πακέτου λογισμικού Microsoft Office. Στα διάφορα κελιά εισάγονται τα δεδομένα του προβλήματος, δηλαδή τα κελιά στα οποία περιέχονται οι μεταβλητές απόφασης, τα κελιά στα οποία γίνονται οι διάφοροι υπολογισμοί και τα κελιά στα οποία περιέχονται κατατοπιστικές πληροφορίες για τον χρήστη. Εισάγεται αρχικά το κελί της αντικειμενικής συνάρτησης ως SUMPRODUCT, στην Αναφορά Απάντησης 'Target Cell' επιζητείται η μεγιστοποίηση, ελαχιστοποίηση ή ισότητα με μία τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης με τίτλο 'Adjustable Cells' τοποθετούνται οι μεταβλητές απόφασης προς υπολογισμό με αρχική τιμή μηδέν και στην περιοχή με τίτλο 'Constraints' εισάγονται οι περιορισμοί.

Το πρόγραμμα **Lindo (Linear Discrete Optimizer)**. Αρχικά εισάγεται η αντικειμενική συνάρτηση στη μορφή MAX ή MIN, έπειτα εισάγονται όλοι οι περιορισμοί του προβλήματος μεταξύ των γραμμών SUBJECT TO ή SUCH THAT και END.

Στο αριστερό μέλος τοποθετούνται μεταβλητές μόνο με τους συντελεστές τους, ενώ στο δεξιό μέλος μόνο σταθερούς αριθμούς. Προαιρετικά μετά το END εισάγονται περισσότεροι περιορισμοί. Τέλος, επιλέγοντας το κουμπί SOLVE προκύπτει η λύση του LINDO.

Το πακέτο ελεύθερου λογισμικού LibreOffice. Το LibreOffice είναι το ελεύθερο πακέτο Ανοικτού Κώδικα για τον έλεγχο παραγωγικότητας. Αποτελεί τη μη εμπορική εκδοχή του προγράμματος Excel. Για το λόγο αυτό υπάρχουν πολλές ομοιότητες ανάμεσα στα δύο λογισμικά.

### 3.5 Ακέραιος Προγραμματισμός

Ο Ακέραιος Προγραμματισμός (Integer Programming-IP) είναι μια ιδιαίτερη τεχνική της επιχειρησιακής έρευνας και αποτελεί μια ειδική περίπτωση των προβλημάτων του γραμμικού προγραμματισμού. Όταν δεν ικανοποιείται η υπόθεση της **διαιρετότητας (divisibility)** χρησιμοποιείται ο ακέραιος προγραμματισμός. Η ιδιαιτερότητα αυτών των προβλημάτων έγκειται στο γεγονός ότι οι μεταβλητές δεν παίρνουν συνεχείς τιμές αλλά ακέραιες. Επομένως τίθεται η ανάγκη ύπαρξης ακέραιων μεταβλητών απόφασης. Για παράδειγμα, όταν γίνεται ανάθεση εργασιών σε ένα σύνολο ανθρώπων, μηχανών ή οχημάτων, οι δραστηριότητες αυτές (μεταβλητές απόφασης) πρέπει να μετρούνται σε ακέραιες ποσότητες. Συχνά γίνεται αναφορά στον Α.Π. με την πλήρη ονομασία **Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (Integer Linear Programming-ILP)**.

Το μαθηματικό μοντέλο του Ακέραιου Προγραμματισμού είναι το ίδιο με αυτό του γραμμικού προγραμματισμού με τον επιπλέον περιορισμό των ακέραιων μεταβλητών (όλων ή μερικών από αυτές). Στην περίπτωση που κάποιες, αλλά όχι όλες οι μεταβλητές ικανοποιούν αυτό τον περιορισμό, έχουμε πρόβλημα **Μεικτού Ακέραιου Προγραμματισμού (Mixed Integer Programming)**. Όταν όμως όλες οι μεταβλητές επιτρέπεται να λαμβάνουν μόνο ακέραιες τιμές, το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως πρόβλημα **Καθαρού Ακέραιου Προγραμματισμού (Pure Integer Programming)**.

Ο ακέραιος προγραμματισμός προκαλεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς βρίσκει εφαρμογή σε πολλές περιπτώσεις και έχει μεγάλη πρακτική σημασία. Η μεγάλη συνεισφορά του ακέραιου προγραμματισμού είναι η χρήση 0-1 μεταβλητών. Είναι λογικές μεταβλητές που παίρνουν την τιμή '0' ή '1'. Συνήθως δεν έχουν φυσική σημασία αλλά λογικό νόημα. Διευρύνουν σημαντικά το πεδίο εφαρμογής του Γ.Π. Προβλήματα που δεν θα μπορούσαν να λυθούν με συμβατικό Γ.Π., με χρήση 0-1 μεταβλητών και την κατάλληλη μοντελοποίηση μπορούν να λυθούν. Παραδείγματα αποτελούν οι λογικές συνθήκες, τα σταθερά κόστη, οι οικονομίες κλίμακας, τα μη γραμμικά μοντέλα και οι διαζευκτικοί περιορισμοί κ.α.



### 3.6 Δυαδικός Ακέραιος Προγραμματισμός

Το παραπάνω πρόβλημα, στο οποίο οι μεταβλητές λαμβάνουν αποκλειστικά τις τιμές 0,1 ονομάζεται πρόβλημα **Δυαδικού Ακέραιου Προγραμματισμού (Binary Integer Programming)**, ενώ οι μεταβλητές ονομάζονται **δυαδικές μεταβλητές (binary variables)**.

Υπάρχουν κάποιες περιοχές, όπου ο ακέραιος προγραμματισμός έχει διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην υποστήριξη των διοικητικών αποφάσεων. Μια από αυτές είναι ο **προϋπολογισμός κεφαλαίου (capital budgeting)**. Σε ένα τυπικό πρόβλημα προϋπολογισμού του κεφαλαίου, οι αποφάσεις περιλαμβάνουν την επιλογή ενός αριθμού από πιθανές επενδύσεις. Σε ένα τέτοιου πρόβλημα λαμβάνονται οι μεταβλητές απόφασης με τιμές '0' ή '1', υποδεικνύοντας την απόρριψη ή την αποδοχή της εκάστοτε επένδυσης.

### 3.7 Ο αλγόριθμος του Excel Solver για Ακέραιο Προγραμματισμό

Στην παρούσα μελέτη θα επιλυθεί το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής πόρων αρκετές φορές με την βοήθεια του Ακέραιου Προγραμματισμού. Πιο συγκεκριμένα, η βελτιστοποίηση της συντήρησης θα πραγματοποιηθεί με βάση το εργαλείο επίλυσης του Excel (Excel Solver).

Στο παρόν υποκεφάλαιο, θα αποσαφηνιστεί ο αλγόριθμος, στον οποίο στηρίζεται το Excel Solver για τα προβλήματα Ακέραιου Προγραμματισμού. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος ανήκει στην κατηγορία των **αλγορίθμων τυφλής αναζήτησης (Blind Search Algorithms)** και ονομάζεται **αλγόριθμος επέκτασης και οριοθέτησης (Branch and Bound algorithm)**.

#### 3.7.1 Αλγόριθμοι τυφλής αναζήτησης

Οι αλγόριθμοι τυφλής αναζήτησης ( Blind Search Algorithms) εφαρμόζονται σε προβλήματα στα οποία δεν υπάρχει πληροφορία που να επιτρέπει αξιολόγηση των καταστάσεων.

Στους αλγορίθμους τυφλής αναζήτησης έχει σημασία η χρονική σειρά με την οποία παράγονται οι καταστάσεις από το μηχανισμό επέκτασης.

Στον παρακάτω πίνακα, παρατίθενται διάφορα είδη αλγορίθμων τυφλής αναζήτησης.

**Πίνακας 3.2:** Είδη αλγορίθμων τυφλής αναζήτησης

| Όνομα Αλγορίθμου      | Συντομογραφία | Ελληνική Ορολογία            |
|-----------------------|---------------|------------------------------|
| Depth-First Search    | DFS           | Αναζήτηση Πρώτα σε Βάθος     |
| Breadth-First Search  | BFS           | Αναζήτηση Πρώτα σε Πλάτος    |
| Iterative Deepening   | ID            | Επαναληπτική Εκβάθυνση       |
| Bi-directional Search | BiS           | Αναζήτηση Διπλής Κατεύθυνσης |
| Branch and Bound      | B&B           | Επέκταση και Οριοθέτηση      |
| Beam Search           | BS            | Ακτινωτή Αναζήτηση           |

### 3.7.2 Αλγόριθμοι Επέκτασης και Οριοθέτησης

Ο βασικός αλγόριθμος Επέκτασης και Οριοθέτησης εισήχθη το 1960 από τους Ailsa H. Land και Alison G. Doing για το γενετικό μεικτό πρόβλημα Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού και επεκτάθηκε το 1965 από τον Egon Balas για το δυαδικό 0-1 πρόβλημα Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού. Οι αλγόριθμοι επέκτασης και οριοθέτησης (Branch and Bound-B&B) εφαρμόζονται σε προβλήματα όπου αναζητείται η βέλτιστη λύση (ελάχιστο κόστος). Αναζητούν τον πλήρη χώρο λύσεων για ένα δεδομένο πρόβλημα για την βέλτιστη λύση. Ωστόσο, η ακριβής απαρίθμηση είναι συνήθως αδύνατη εξαιτίας του εκθετικά αυξανόμενου αριθμού των πιθανών λύσεων. Η χρήση των ορίων για τη συνάρτηση που βελτιστοποιείται συνδυασμένη με την υπάρχουσα τιμή της καλύτερης λύσης επιτρέπει στον αλγόριθμο να αναζητήσει μέρη του χώρου λύσεων έμμεσα.

Σε οποιαδήποτε σημείο της διαδικασίας επίλυσης, η κατάσταση της λύσης αναφορικά με την αναζήτηση του χώρου λύσεων περιγράφεται από ανεξερεύνητο υποσύνολο αυτού και τη βέλτιστη λύση που έχει βρεθεί μέχρι τώρα. Αρχικά, υπάρχει μόνο ένα υποσύνολο, δηλαδή ο πλήρης χώρος λύσεων και η βέλτιστη λύση που έχει βρεθεί μέχρι τώρα είναι το  $\infty$ . Τα ανεξερεύνητα υποσύνολα αντιπροσωπεύονται ως κόμβοι σε ένα δυναμικά

παραγόμενο δέντρο αναζήτησης, το οποίο αρχικά περιέχει μόνο την ρίζα και κάθε επανάληψη του αλγορίθμου επέκτασης και οριοθέτησης επεξεργάζεται ένα τέτοιο κόμβο. Η επανάληψη έχει τρεις βασικές συνιστώσες: επιλογή του κόμβου προς επεξεργασία, δεσμευμένος υπολογισμός και διακλάδωση.

Η αλληλουχία αυτών μπορεί να ποικίλει ανάλογα με την επιλεχθείσα στρατηγική για την επιλογή του επόμενου κόμβου προς επεξεργασία. Αν η επιλογή του επόμενου υποπροβλήματος βασίζεται στη δεσμευμένη αξία των υποπροβλημάτων, τότε η πρώτη λειτουργία της επανάληψης μετά την επιλογή του κόμβου είναι η διακλάδωση, δηλαδή η υποδιαίρεση του χώρου λύσεων του κόμβου σε δύο ή περισσότερους υποχώρους. Για κάθε έναν από τους δύο, ελέγχεται εάν ο υπόχωρος αποτελείται από μια μοναδική λύση. Σε αυτή την περίπτωση, συγκρίνεται με την υπάρχουσα βέλτιστη λύση, κρατώντας την καλύτερη εξ' αυτών. Διαφορετικά, υπολογίζεται η δεσμευμένη συνάρτηση για τον υπόχωρο και συγκρίνεται με την υπάρχουσα βέλτιστη λύση. Εάν μπορεί να αποδειχτεί ότι ο υπόχωρος δεν μπορεί να περιέχει τη βέλτιστη λύση, ο συνολικός υπόχωρος απορρίπτεται, διαφορετικά αποθηκεύεται σε μια δεξαμενή από ζωντανούς κόμβους μαζί με τα όρια αυτών.

Η εναλλακτική είναι να ξεκινήσει υπολογίζοντας το όριο του επιλεγμένου κόμβου. Οι κόμβοι που δημιουργούνται, έπειτα, αποθηκεύονται μαζί με το όριο του επεξεργασμένου κόμβου. Αυτή η στρατηγική ονομάζεται «νωθρή» και συχνά χρησιμοποιείται όταν ο επόμενος κόμβος προς επεξεργασία επιλέγεται να είναι ένας ζωντανός κόμβος του μέγιστου βάθους του δέντρου αναζήτησης.

Η έρευνα τερματίζεται, όταν δεν υπάρχουν ανερευνήτα κομμάτια του χώρου λύσεων και η βέλτιστη λύση είναι, τότε, η καλύτερη δυνατή. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος ουσιαστικά «κλαδεύει» καταστάσεις (pruning) και μειώνει το χώρο αναζήτησης.

### 3.8 Επιλογή του Μοντέλου της Διπλωματικής Εργασίας

Λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση μοντέλων προγραμματισμού έτσι όπως εμφανίζονται στο θεωρητικό υπόβαθρο της Διπλωματικής Εργασίας, προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος της Διπλωματικής Εργασίας, που είναι η βέλτιστη κατανομή των πόρων για τη συντήρηση και αντικατάσταση των οχημάτων ενός στόλου λεωφορείων, επιλέχθηκε να αναπτυχθεί και να εφαρμοσθεί ένα μοντέλο βελτιστοποίησης το οποίο βασίζεται στις αρχές του Ακέραιου Προγραμματισμού. Το παραπάνω προσφέρεται ως ένα υπολογιστικό πακέτο του Microsoft Excel, ονομάζεται Open Solver for excel και χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο CBC, γνωστό ως λειτουργία κρυπτογράφησης.

Συγκεκριμένα, στο πρόβλημα εισάγεται μοναδική αντικειμενική συνάρτηση για την οποία επιδιώκεται ελαχιστοποίηση καθώς εκφράζει το κόστος που επέρχεται μέσω των ενεργειών συντήρησης και αντικατάστασης των λεωφορείων. Σε αυτήν εισάγονται οι μεταβλητές απόφασης  $X_{ijk}$ ,  $Y_{ijk}$ ,  $P_{jk}$ , όπου η  $i$  ηλικία του κάθε λεωφορείου,  $j$  η χρονική στιγμή απόφασης,  $k$  ο τύπος κάθε λεωφορείου. Η μεταβλητή  $X_{ijk}$  εκφράζει τον αριθμό των λεωφορείων  $k$ -τύπου,  $i$ -ηλικίας που βρίσκονται σε λειτουργία το έτος  $j$ , η μεταβλητή  $Y_{ijk}$  τον αριθμό των λεωφορείων  $k$ -τύπου,  $i$ -ηλικίας που θα πουληθούν το έτος  $j$  και η μεταβλητή  $P_{jk}$  τον αριθμό των λεωφορείων  $k$ -τύπου,  $i$ -ηλικίας που αγοράζονται το έτος  $j$ . Τα δεδομένα εισαγωγής στο προγραμματιστικό μοντέλο και η πλήρης περιγραφή του αναλύονται στα κεφάλαια 4 και 5.

## Στατιστικά δεδομένα-Ανάπτυξη μοντέλου βελτιστοποίησης

---

### 4.1 Γενικά

Ύστερα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση των αποτελεσμάτων και των μεθοδολογιών από έρευνες συναφείς με το αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας ακολούθησε η παρουσίαση του θεωρητικού υποβάθρου πάνω στο οποίο στηρίχτηκε η παρούσα Διπλωματική Εργασία.

Formatted: Greek

Formatted: Greek

Σε αυτό το κεφάλαιο περιλαμβάνονται τα εξής:

- Το είδος των δεδομένων που συλλέχθηκαν και η σημασία τους για το μοντέλο βελτιστοποίησης που εφαρμόστηκε.
- Η περιγραφή των τεχνολογιών των λεωφορείων για τα οποία έγινε η ανάλυση .
- Η περιγραφή των ερευνών από τις οποίες εξήχθησαν τα δεδομένα.
- Η περιγραφή του μοντέλου και η διαδικασία εφαρμογής του.
- Η ανάλυση όλων των παραμέτρων, των περιορισμών και των υποθέσεων που χρησιμοποιήθηκαν.
- Περιγραφή μαθηματικής επίλυσης στο excel

### 4.2 Εισαγωγικά στοιχεία για τα λεωφορεία

Το λεωφορείο αποτελεί το συνηθέστερο μέσο αστικών συγκοινωνιών, τόσο σε μεγάλα όσο και σε μικρά αστικά κέντρα. Τα συνηθή λεωφορεία, τα οποία αποτέλεσαν και το αντικείμενο έρευνας στη συγκεκριμένη Διπλωματική Εργασία, έχουν μήκος 12 μέτρα και χωρητικότητα 80-100 άτομα. Επίσης υπάρχουν τα αρθρωτά λεωφορεία, μήκους 18 μέτρων και χωρητικότητας 120-150 ατόμων, καθώς και τα mini-buses, μήκους 8 μέτρων και χωρητικότητας 60 ατόμων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το χρησιμοποιούμενο καύσιμο για την κίνηση των λεωφορείων είναι το πετρέλαιο, αν και υπάρχουν λεωφορεία

που κινούνται με φυσικό αέριο (Compressed Natural Bus), λεωφορεία που διαθέτουν υβριδικά συστήματα κίνησης και άλλα νέας τεχνολογίας που είναι ηλεκτρικά και χρησιμοποιούν μόνο μπαταρία.

#### 4.2.1 Ο ρόλος των αστικών συγκοινωνιών και ειδικότερα των λεωφορειών

Οι αστικές συγκοινωνίες χαρακτηρίζονται από τρεις διαστάσεις σχετικά με το ρόλο τους στον Αστικό χώρο. Βασική διάσταση αποτελεί ο κοινωνικός τους χαρακτήρας, καθώς οι αστικές συγκοινωνίες εξασφαλίζουν στο σύνολο των κατοίκων μιας πόλης ένα ελάχιστο επίπεδο κινητικότητας και δικαιώματος στις μετακινήσεις (Βλαστός 1997). Επιπλέον, οι αστικές συγκοινωνίες εξυπηρετούν τους επισκέπτες μιας πόλης και αποτελούν δείγμα της φιλοξενίας που παρέχεται από την πόλη.

Η δεύτερη διάσταση αφορά το ρόλο των αστικών συγκοινωνιών ως αντίβαρου στη χρήση των οχημάτων ιδιωτικής χρήσης (Γιαννόπουλος 1994). Καλύτερες αστικές συγκοινωνίες σημαίνουν μείωση στη χρήση του ΙΧ και των δυσμενών επιπτώσεων του στο αστικό περιβάλλον (φυσικό και κοινωνικοοικονομικό) . Ένα αξιόπιστο και λειτουργικό σύστημα αστικών συγκοινωνιών μπορεί να προσφέρει οικονομική, γρήγορη και αρκετά άνετη μετακίνηση, χωρίς την ενεργή συμμετοχή του μετακινούμενου.

Η τρίτη διάσταση είναι εκείνη των αστικών συγκοινωνιών ως φορέων οι οποίοι πρέπει να είναι οικονομικά βιώσιμοι. Οι αστικές συγκοινωνίες μπορούν να αντιμετωπισθούν είτε ως επιχειρήσεις είτε ως κοινωνικό αγαθό με την παροχή ιδιαίτερα υψηλής κρατικής στήριξης. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι ο διττός αυτός ρόλος των αστικών συγκοινωνιών είναι κρίσιμος τόσο κατά το σχεδιασμό όσο και κατά τη λειτουργία τους, αφού θα πρέπει να διατηρηθεί η ισορροπία ανάμεσα στην οικονομική βιωσιμότητα και τις κοινωνικές προεκτάσεις της λειτουργίας ενός συστήματος αστικών συγκοινωνιών (American PUBLIC Transportation Association, 2004)

Το λεωφορείο αποτελεί το πλέον διαδεδομένο και ευρέως χρησιμοποιούμενο μέσο αστικών συγκοινωνιών διεθνώς. Η ευελιξία και η αυτονομία του ως όρος την παροχή ενέργειας το καθιστούν κατάλληλο για κίνηση σχεδόν οπουδήποτε στον αστικό ιστό. Επιπλέον, οι ανάγκες του σε υποδομές είναι περιορισμένες και αφορούν τις στάσεις, τα διαθέσιμα οχήματα, τους χώρους συντήρησης και στάθμευσης, τις εγκαταστάσεις ανατροφοδότησης (στην ειδική περίπτωση των λεωφορειών που κινούνται αποκλειστικά με μπαταρία). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το χαμηλό κόστος, τόσο στην αρχική επένδυση όσο και στη λειτουργία και συντήρηση του μέσου. Πρόκειται για το βασικό μέσο αστικών συγκοινωνιών σε πόλεις μικρού και μέσου μεγέθους, ενώ έχει σημαντικό ρόλο

στα συστήματα συγκοινωνιών των μεγαλύτερων σε μέγεθος πόλεων. Η αύξηση των τιμών των καυσίμων, η αυξανόμενη αστικοποίηση, η αύξηση της κυκλοφοριακής συμφόρησης, η μεταβολή των προτιμήσεων των καταναλωτών και η αύξηση των ανησυχιών για την υγεία και το περιβάλλον έχουν οδηγήσει τους καταναλωτές να στραφούν στη χρήση των λεωφορείων έναντι των ΙΧ.

Για την πραγματοποίηση αυτού του σύνθετου ρόλου που πρέπει να καλύψουν τα λεωφορεία στις μέρες μας είναι κρίσιμη η τακτική συντήρηση αυτών, κάτι που αποτελεί ένα από τα βασικά συστατικά για την περαιτέρω ανάπτυξή τους. Κρίσιμη, ωστόσο, θεωρείται η βέλτιστη κατανομή πόρων για τη λειτουργία, συντήρηση και αντικατάσταση των λεωφορείων, ώστε να επιτευχθεί η βαθμιαία μείωση του κόστους με την υψηλότερη απόδοση του οργανισμού. Αποτέλεσμα των παραπάνω ενεργειών θα είναι βελτίωση της ανταγωνιστικής θέσης των λεωφορείων έναντι των υπόλοιπων οχημάτων.

#### 4.2.2 Τεχνολογίες κινητήρων λεωφορείων

Το σύνηθες καύσιμο κίνησης των λεωφορείων είναι το πετρέλαιο. Τα περισσότερα λεωφορεία διαθέτουν **πετρελαιοκινητήρες** οι οποίοι έχουν υψηλή απόδοση, απλή κατασκευή και συντήρηση. Πολλοί από αυτούς συνοδεύονται από υπερσυμπιεστή για βελτίωση της απόδοσής τους. Παρά τα πλεονεκτήματά τους, οι πετρελαιοκινητήρες, ειδικά αν είναι ανεπαρκώς συντηρημένοι, έχουν τα μειονεκτήματα της εκπομπής καυσαερίων, των αυξημένων δονήσεων και θορύβων. Επίσης, η αβεβαιότητα της τιμής του πετρελαίου αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα για τη λειτουργία τους. Βέβαια, η εξέλιξη της τεχνολογίας στους κινητήρες εσωτερικής καύσης έχει ελαχιστοποιήσει στο μέτρο του δυνατού τα προβλήματα αυτά, πλην όμως η συντήρηση είναι σημαντική για τις μικρότερες δυνατές συνέπειες από τη λειτουργία των πετρελαιοκινητήρων.



**Φωτογραφία 1:** Πετρελαιοκίνητο λεωφορείο

Βασική εναλλακτική λύση στους πετρελαιοκίνητους είναι η **ηλεκτροκίνηση**, η οποία εφαρμόζεται συνήθως με την εξωτερική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα τρόλεϊ είναι ένα από τα βασικότερα μέσα μαζικής μεταφοράς στην Αθήνα. Το ανταγωνιστικό τους πλεονέκτημα είναι η ηλεκτροκίνηση. Αυτό σημαίνει ότι τα τρόλλεϊ υπερτερούν, έναντι των πετρελαιοκίνητων λεωφορείων, των κύριων ανταγωνιστών τους, καθώς χρησιμοποιούν ηλεκτρισμό. Τα τρόλεϊ παρουσιάζουν πολύ καλές και ομαλές επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις λόγω του κινητήρα, χαμηλά επίπεδα θορύβου και σχεδόν μηδενικές εκπομπές ρύπων. Όμως, για την εφαρμογή τους απαιτείται υψηλό κόστος κατασκευής της υποδομής (ηλεκτροφόρα σύρματα) και συντήρησής τους. Επίσης, η ευελιξία τους περιορίζεται από την ανάγκη ύπαρξης της εξωτερικής παροχής ενέργειας. Το μειονέκτημα της εξωτερικής παροχής ενέργειας έχει απαλυνθεί στα σύγχρονα τρόλεϊ, τα οποία διαθέτουν συσσωρευτές ενέργειας οι οποίοι μπορούν να προσφέρουν αυτονομία κάποιων χιλιομέτρων ή διαθέτουν εφεδρικούς πετρελαιοκίνητους. Έτσι, στις περιπτώσεις διακοπής της παροχής ηλεκτρικού ρεύματος ή ανάγκης απαγκίστρωσης από τα ηλεκτροφόρα καλώδια, τα τρόλεϊ μπορούν να κινηθούν αυτόνομα σε αποστάσεις μέχρι και 80-100 χιλιόμετρα.





**Φωτογραφία 2:** Ηλεκτροκίνητο λεωφορείο ή τρόλεϊ

Μια άλλη τεχνολογία (χρησιμοποιούμενη κυρίως στην Ευρώπη), είναι αυτή των **κινητήρων φυσικού αερίου** (λεωφορεία τύπου CNG – Compressed Natural Gas). Οι κινητήρες είναι περισσότερο φιλικό προς το περιβάλλον, το καύσιμό τους είναι φθηνό, αλλά απαιτούνται ειδικές εγκαταστάσεις και προσωπικό συντήρησης των λεωφορείων και αποθήκευσης καυσίμων.



**Φωτογραφία 3:** Λεωφορείο φυσικού αερίου

Επίσης, **υβριδικά οχήματα** είναι η πλέον υποσχόμενη τεχνολογία στις επίγειες αστικές συγκοινωνίες. Τα οχήματα αυτά χρησιμοποιούν συνδυασμό ηλεκτροκινητήρα με συσσωρευτές και κινητήρα άλλου τύπου (για παράδειγμα πετρελαιοκινητήρα). Το πετρέλαιο ντίζελ εξαιρετικά χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο είναι το πιο κοινό καύσιμο που χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία της μηχανής καύσης σε υβριδικά οχήματα, αν και άλλα καύσιμα όπως βενζίνη, συμπιεσμένο φυσικό αέριο (CNG), υγρό φυσικό αέριο (LNG), βιοντίζελ και υδρογόνο μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Υπάρχουν δύο τύποι υβριδικών οχημάτων:

- α) Οχήματα που χρησιμοποιούν τον ηλεκτροκινητήρα για τη μετάδοση της κίνησης και τον άλλο κινητήρα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτεί έναν κινητήρα ο οποίος μετατρέπει τους τροχούς του οχήματος. Η γεννήτρια επαναφορτίζει επίσης μια μπαταρία που παρέχει συμπληρωματική ισχύ στον κινητήρα. Δεδομένου ότι ο κινητήρας δεν είναι συνδεδεμένος με τους τροχούς, μπορεί να λειτουργεί με βέλτιστο ρυθμό και μπορεί ακόμη και να απενεργοποιηθεί για σύντομες χρονικές περιόδους για προσωρινή ηλεκτρική λειτουργία του λεωφορείου. (σειριακός τύπος)
- β) Οχήματα που χρησιμοποιούν τόσο τον ηλεκτροκινητήρα όσο και τον άλλο κινητήρα για τη μετάδοση της κίνησης αλλά και για την παροχή ενέργειας στον ηλεκτροκινητήρα. Σε έναν παράλληλο υβριδικό λεωφορείο, ο κινητήρας καύσης και ο ηλεκτροκινητήρας συνδέονται ανεξάρτητα στο κιβώτιο ταχυτήτων. Κατά την επιτάχυνση, τόσο ο ηλεκτροκινητήρας όσο και ο κινητήρας καύσης τροφοδοτούν το κιβώτιο ταχυτήτων. Επιπλέον, μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται Ανατροφοδοτική Πέδηση (regenerative braking), η ενέργεια που χάθηκε λόγω της πέδησης ανακτάται και χρησιμοποιείται για τη φόρτιση της μπαταρίας. (παράλληλος τύπος)



**Φωτογραφία 5:** Υβριδικό λεωφορείο

**Πίνακας 4.1:** Σύγκριση κινητήρων υβριδικής τεχνολογίας

| Τύπος υβριδικής διαμόρφωσης | Πλεονεκτήματα   | Μειονεκτήματα   |
|-----------------------------|---|---|
| Σειριακή                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Επιτρέπει στη βοηθητική μονάδα ισχύος να λειτουργεί ανεξάρτητα από τις εντολές του οδηγού για παροχή ρεύματος, γεγονός που μειώνει τις εκπομπές ρύπων</li> <li>• Συμβατό με τις κυψέλες καυσίμων</li> <li>• Σύστημα ενεργειακής απόδοσης όταν το όχημα λειτουργεί σε κατάσταση “σταμάτα-ξεκίνα” (stop and go)</li> <li>• Το κιβώτιο ταχυτήτων δεν είναι απαραίτητο</li> </ul>                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Η μηχανική ενέργεια του κινητήρα μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια και μετά μετατρέπεται σε μηχανική μέσα στον κινητήρα</li> <li>• Λιγότερο κατάλληλο για χρήση σε αυτοκινητόδρομο υψηλών ταχυτήτων, εάν είναι εφοδιασμένο με μικρή βοηθητική μονάδα ισχύος (AUXILIARY POWER UNIT)</li> </ul> |
| Παράλληλη                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Η μπαταρία παρέχει πρόσθετη ισχύ κατά τις επιταχύνσεις. Ως εκ τούτου, ο κινητήρας μπορεί να έχει μικρότερο μέγεθος από ό, τι στα συμβατικά λεωφορεία ντίζελ για συγκρίσιμες επιταχύνσεις</li> <li>• Η άμεση μηχανική διαδρομή κίνησης είναι πιο αποτελεσματική σε ορισμένες λειτουργίες οδήγησης, ιδιαίτερα σε σταθερή κατάσταση υψηλής ταχύτητας, όπως στην οδήγηση σε αυτοκινητόδρομους</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Συνήθως δεν διευκολύνει την εγκατάσταση μιας μη μηχανικής APU, όπως μια κυψέλη καυσίμου</li> <li>• Λιγότερο ικανή να καταγράψει όλη την διαθέσιμη ενέργεια πέδησης με ανάκτηση όταν χρησιμοποιούνται πακέτα μικρών μπαταριών σε συστήματα κινητήρων</li> </ul>                                 |

#### 4.2.2 Κρίσιμοι παράγοντες για τη διαχείριση στόλου λεωφορείων

Το παρόν υποκεφάλαιο έχει στόχο να αποσαφηνίσει τους κρίσιμους παράγοντες που παίζουν ρόλο για τη λειτουργία, τη συντήρηση και την αντικατάσταση των διαφορετικών τύπων λεωφορείων, δηλαδή τους παράγοντες που ουσιαστικά σκιαγραφούν τα κόστη διαχείρισης ενός στόλου λεωφορείων.

#### 4.2.2.1 Ηλικία λεωφορείων και διανυθέντα χιλιόμετρα

Η ηλικία των λεωφορείων καθώς και η συχνότητα χρήσης τους αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες επιρροής του κόστους συντήρησής τους. Από έρευνες προκύπτει πως η αύξηση της ηλικίας του εξοπλισμού ενός λεωφορείου οδηγεί σε αυξημένα κόστη συντήρησης και λειτουργίας του.

#### 4.2.2.2 Δαπάνες συντήρησης μηχανικών εξαρτημάτων

Κατά τη συντήρηση των λεωφορείων οι ενέργειες που είναι απαραίτητο να γίνουν είναι οι παρακάτω:

- Κόστος συντήρησης που σχετίζεται με την πρόωση: Αποτελείται από επισκευές στο σύστημα καυσαερίων, καυσίμου και ηλεκτροπαραγωγής (κινητήρας, σύστημα μπαταρίας έλξης και στοίβα κυψελών καυσίμου), στο σύστημα πρόωσης, στο σύστημα εισαγωγής αέρα, στο σύστημα ψύξης και στα κιβώτια ταχυτήτων . Τα έξοδα επισκευής εξαρτημάτων του συστήματος πέδησης με ανάκτηση ενέργειας υπάγονται στην κατηγορία αυτή επειδή αποτελούν μέρος της ηλεκτρικής ή υβριδικής τεχνολογίας. Ωστόσο, τα βασικά στοιχεία του συστήματος πέδησης, όπως τα τακάκια των φρένων και τα εξαρτήματα φρένων, δεν περιλαμβάνονται στην κατηγορία που αφορά την πρόωση.
- Κόστος πέδησης: Περιλαμβάνει την αντικατάσταση των τακακίων, των φρένων και υπόλοιπα κόστη σχετικά με τα φρένα που δεν είναι μοναδικά στο σύστημα "Πέδηση με Ανάκτηση".
- Προληπτικές επιθεωρήσεις συντήρησης (Preventive Maintenance Inspections): Αποτελείται από εργασία για προληπτικές επιθεωρήσεις συντήρησης. Ορισμένες επιθεωρήσεις βασίζονται στα χιλιόμετρα που έχει διανύσει το λεωφορείο και άλλες βασίζονται στην ηλικία του λεωφορείου.
- Άλλα κόστη συντήρησης: Περιλαμβάνει όλες τις επισκευές για την καμπίνα, το σώμα και τα αξεσουάρ, το πλαίσιο, το σύστημα ζυγοστάθμισης και ανάρτησης, τη θέρμανση, το εξαερισμό και κλιματισμό (Heating Ventilation Air Conditioning), το φωτισμό, το γενικό σύστημα αέρα, τους άξονες, τους τροχούς και την κινητήρια άτρακτο, τα ελαστικά
- Συνολική συντήρηση: Είναι το άθροισμα όλων των ανωτέρω δαπανών συντήρησης.

#### 4.2.2.3 Τοπογραφία και ταχύτητα κίνησης λεωφορείων

Παράμετροι που έχουν αντίκτυπο στη διαμόρφωση του κόστους λειτουργίας του λεωφορείου είναι η τοπογραφία της περιοχής και η κατάσταση των δρόμων που κινείται το λεωφορείο, καθώς όσο πιο πολλές εδαφικές ανομοιομορφίες υπάρχουν τόσο περισσότερα προβλήματα και πιθανότητες φθοράς του λεωφορείου προκύπτουν με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους συντήρησης και λειτουργίας. Επιπλέον, η

συμπεριφορά του οδηγού στον τρόπο λειτουργίας του λεωφορείου καθώς και η ταχύτητα κίνησής του επηρεάζουν σημαντικά την αποδοτικότητα της μηχανής και του συστήματος πέδησης και συνεπώς το κόστος συντήρησής τους.

#### 4.2.2.4 Οικονομικοί παράγοντες

Σημαντικό μέρος του κόστους διαχείρισης στόλου λεωφορείων αποτελούν τα κόστη απόκτησης και μεταπώλησης των λεωφορείων. Παράγοντες που παίζουν ρόλο στη διαμόρφωση της τιμής των λεωφορείων είναι η τεχνολογία του κινητήρα, η ηλικία και η χρήση του. Επίσης, η τιμή των λεωφορείων διαφέρει από χώρα σε χώρα και μεταβάλλεται ανάλογα με τους δημοσιονομικούς περιορισμούς. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές της Ομοσπονδιακής Υπηρεσίας Αστικών Συγκοινωνιών (Federal Transit Agency, 1992) μπορεί να υπάρξει επιχορήγηση από το κράτος έως και 80% για την αγορά λεωφορείων. Ακόμα ένας οικονομικός παράγοντας που είναι ζωτικής σημασίας για τη διαμόρφωση των τιμών είναι ο πληθωρισμός.

#### 4.2.2.5 Τιμές καυσίμων και κοινωνικό κόστος εκπομπής καυσαερίων

Για την αποτελεσματική λειτουργία ενός οργανισμού διαχείρισης στόλου λεωφορείων πρέπει να ληφθούν υπόψη η οικονομία των καυσίμων που χρησιμοποιούν οι κινητήρες (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, ηλεκτρισμός) καθώς και η εκπομπή ρύπων του κάθε τύπου λεωφορείου. Προφανώς, η τιμή του κάθε καυσίμου διαφέρει ανάλογα με το είδος του καυσίμου, την περιοχή, τη χρονική περίοδο. Άμεση σχέση με τη λειτουργία του λεωφορείου έχει η εκπομπή καυσαερίων του θερμοκηπίου, με αποτέλεσμα η μείωση τους να κρίνεται αναγκαία. Τρόποι μείωσης των εκπομπών καυσαερίων επιβλαβών για το περιβάλλον, είναι η αντικατάσταση των παλαιών τεχνολογιών κινητήρων με νέους φιλικούς προς το περιβάλλον, η επιβολή προστίμου για την ατμοσφαιρική ρύπανση, η χρήση καυσίμων που δεν επιδρούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

#### 4.2.2.6 Αποδοτικότητα κινητήρα

Η διαχείριση ανομοιογενούς στόλου λεωφορείων συνεπάγεται τη λειτουργία και συντήρηση διαφορετικών κινητήρων και μηχανών. Ο κάθε κινητήρας έχει διαφορετική αποδοτικότητα καυσίμου. Όσο η τεχνολογία εξελίσσεται, οι κινητήρες γίνονται αποδοτικότεροι και φιλικότεροι προς το περιβάλλον, χωρίς αυτό να σημαίνει πως υπάρχει ο βέλτιστος κινητήρας για χρήση σε λεωφορεία. Έρευνες ωστόσο έχουν αποδείξει πως η αποδοτικότητα του κινητήρα μειώνεται με τη χρήση του σε βάθος χρόνου (Clark et al., 2009).

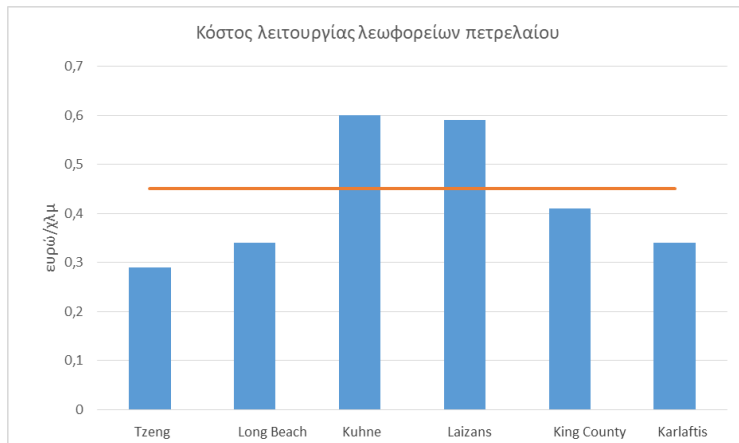
### 4.3 Συλλογή δεδομένων

Για την ορθότητα των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων που εξάγονται μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας, συλλέχθηκαν αρχικά πραγματικά **στοιχεία** από τεχνικές μελέτες και από διάφορους οργανισμούς διαχείρισης στόλου λεωφορείων, οι περισσότεροι από τους οποίους λειτουργούν στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Οι πηγές από τις οποίες αντλήθηκαν τα δεδομένα είναι οι εξής:

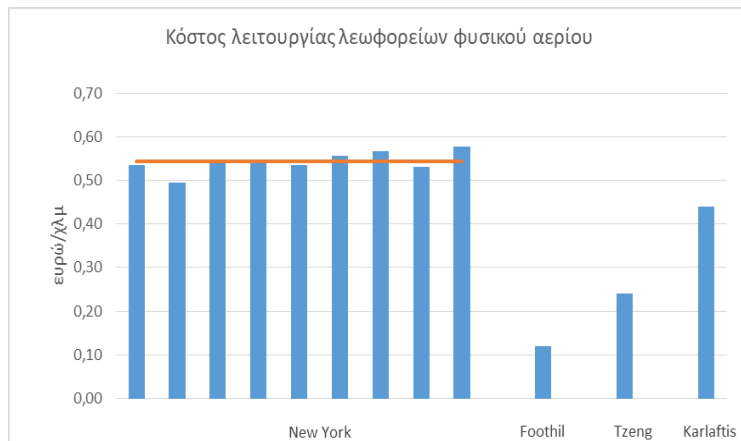
- Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας - Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ (National Renewable Energy Laboratory – U.S. Department of Energy) . Η συγκεκριμένη βάση δεδομένων περιέχει μελέτες που έγιναν σε οργανισμούς διαχείρισης στόλου λεωφορείων:

| Οργανισμός                            | Σύγκριση τύπων λεωφορείων                 |
|---------------------------------------|---|
| Foothil Transit Agency                | Φυσικό αέριο – Ηλεκτρικά                  |
| King County Transit                   | Πετρελαιοκίνητα – Υβριδικά                |
| New York City Transit                 | Πετρελαιοκίνητα – Υβριδικά – Φυσικό αέριο |
| Metropolitan Transportation Authority | Πετρελαιοκίνητα – Φυσικό αέριο            |
| Long Beach City Transit               | Πετρελαιοκίνητα – Φυσικό αέριο            |

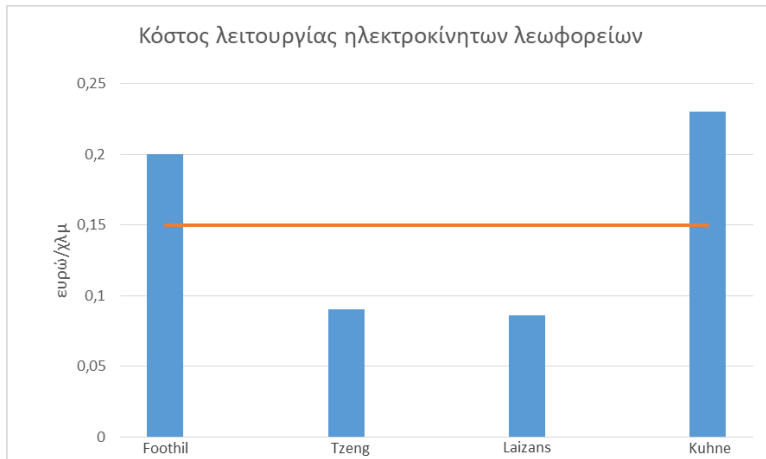
- Μελέτη των Tzeng et al με χρήση στοιχείων από τη βάση δεδομένων του Ινστιτούτου Κυκλοφορίας και Μεταφορών, Εθνικό Πανεπιστήμιο Chia Tung
- Συστήματα αστικών συγκοινωνιών Κωνσταντίνος Λυμπέρης, Ματθαίος Καρλαύτης
- Αμερικανική Ένωση Δημόσιων Μεταφορών (American Public Transportation Association )
- Κέντρο έρευνας και δοκιμών λεωφορείων Altoona, Pennsylvania
- Τεχνική μελέτη του οργανισμού Grütter Consulting
- Μελέτη των Clark et al 2007
- Μελέτη των Laizans et al 2016
- Μελέτη των Kuhne et al 2010 βασισμένη σε πραγματικά δεδομένα του οργανισμού αστικών συγκοινωνιών του Solingen, Γερμανία
- Ομοσπονδιακό Υπουργείο Οικονομίας και Ενέργειας της Γερμανίας
- Κέντρο δεδομένων εναλλακτικών καυσίμων (Alternative Fuels Data Center)
- Βάση δεδομένων Ευρωπαϊκής Στατιστικής Υπηρεσίας (Eurostat)



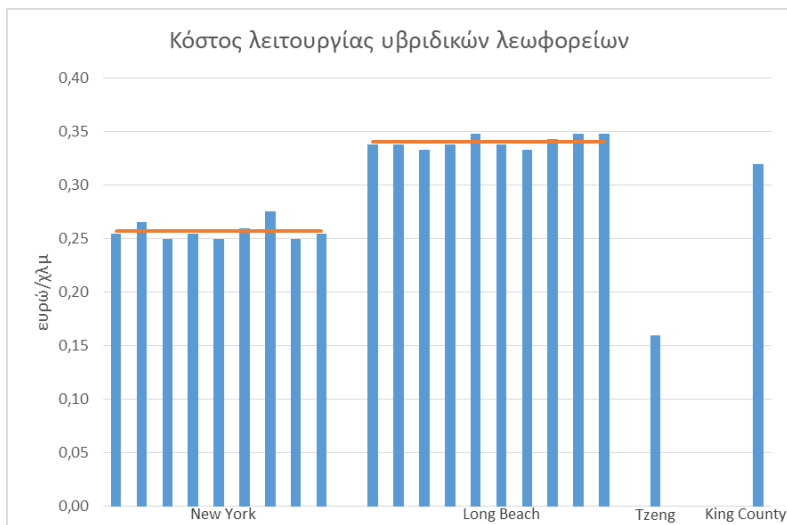
**Σχήμα 4.1:** Τιμές κόστους λειτουργίας πετρελαιοκίνητων



**Σχήμα 4.2:** Τιμές κόστους λειτουργίας λεωφορείων φυσικού αερίου

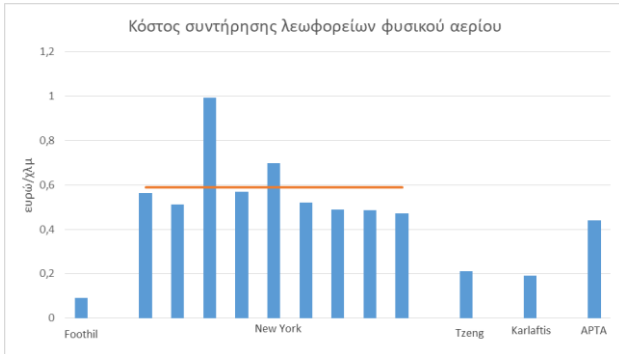


**Σχήμα 4.3:** Τιμές κόστους λειτουργίας ηλεκτροκίνητων λεωφορείων

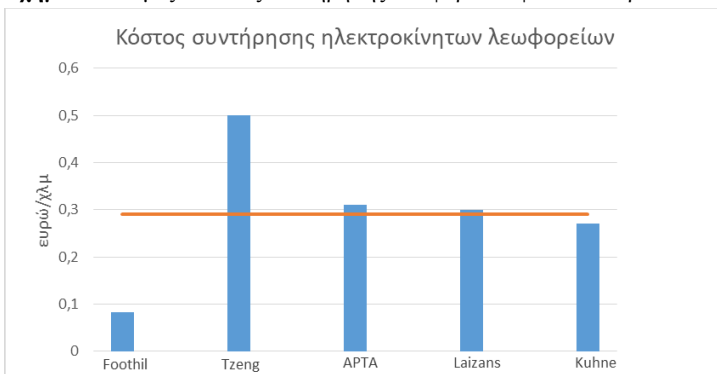


**Σχήμα 4.4:** Τιμές κόστους λειτουργίας υβριδικών λεωφορείων

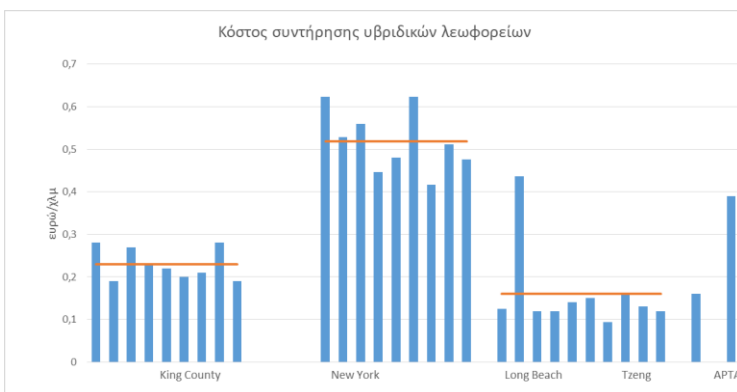




**Σχήμα 4.5:** Τιμές κόστους συντήρησης λεωφορείων φυσικού αερίου



**Σχήμα 4.6:** Τιμές κόστους συντήρησης ηλεκτροκίνητων λεωφορείων



**Σχήμα 4.7:** Τιμές κόστους συντήρησης υβριδικών λεωφορείων



Σχήμα 4.8: Τιμές κόστους συντήρησης πετρελαιοκίνητων λεωφορείων

Πίνακας 4.2: Συγκενρωτικός πίνακας μέσου όρου δεδομένων

| ΜΕΣΟΙ ΟΡΟΙ                           | Μέσοι όροι δεδομένων          | Πετρελαιοκίνητα | Υβριδικά | Φυσικού αερίου | Ηλεκτροκίνητα |
|--------------------------------------|-------------------------------|-----------------|----------|----------------|---------------|
|                                      | κόστος ενέργειας<br>ευρώ/χλμ. |                 | 0,80     | 0,63           | 0,51          |
| κόστος συντήρησης<br>ευρώ/χλμ.       |                               | 0,35            | 0,29     | 0,30           | 0,29          |
| αποδοτικότητα κινητήρα<br>χλμ./λίτρο |                               | 1,6             | 2,1      | 1,6            | x             |
| αποδοτικότητα κινητήρα<br>χλμ./kwh   |                               | x               | x        | x              | 0,82          |
| εκπομπή καυσαερίου<br>κιλά/χλμ.      |                               | 2,290           | 1,722    | 1,732          | 0,124         |
| κόστος καυσίμου<br>ευρώ/λίτρο        |                               | 1,30            | 1,30     | 0,51           | x             |
| κόστος καυσίμου<br>ευρώ/kwh          |                               | x               | x        | x              | 0,20          |
| διανυθέντα χλμ το χρόνο              |                               | 55000           | 50000    | 55000          | 50000         |
| μέσος όρος ταχύτητας<br>χλμ/ώρα      |                               | 20              | 18,5     | 28,3           | 17,7          |
| κόστος αγοράς €                      |                               | 236841          | 394004   | 333954         | 538500        |

#### 4.4 Συμπεράσματα στατιστικών στοιχείων

Παρατηρώντας τους πίνακες και τα διαγράμματα παρατηρούνται τα εξής στοιχεία:

- Το μεγαλύτερο κόστος αγοράς έχουν τα ηλεκτροκίνητα, το μικρότερο τα πετρελαιοκίνητα, ενώ παρόμοιες είναι οι τιμές για τα υβριδικά και του φυσικού αερίου.
- Το κόστος της ενέργειας που καταναλώνεται κατά την κίνηση είναι μεγαλύτερο για τα πετρελαιοκίνητα και μικρότερο για τα ηλεκτροκίνητα.
- Το γενικό κόστος συντήρησης που χρειάζονται τα λεωφορεία είναι παρόμοιο για όλους τους τύπους. Γίνεται η θεώρηση παρακάτω ότι το κόστος συντήρησης μεταβάλλεται με το χρόνο με πιο αρνητικά αποτελέσματα για τα πετρελαιοκίνητα.
- Η αποδοτικότητα του κινητήρα για τη λειτουργία των λεωφορείων είναι μεγαλύτερη για τα ηλεκτροκίνητα κυρίως λόγω της καινοτόμας τεχνολογίας που χρησιμοποιούν.
- Όπως ήταν αναμενόμενο, η εκπομπή καυσαερίων του διοξειδίου του άνθρακα είναι μικρότερη για τα ηλεκτροκίνητα και μεγαλύτερη για τα λεωφορεία που χρησιμοποιούν ρυπογόνο καύσιμο.
- Το πετρέλαιο βρέθηκε να έχει το μεγαλύτερο κόστος σε σχέση με την τιμή του συμπιεσμένου φυσικού αερίου και της τιμής του ηλεκτρισμού, σύμφωνα με τα στοιχεία που συλλέχθηκαν από το Υπουργείο Ανάπτυξης και Ανταγωνιστικότητας.

#### 4.5 Περιγραφή προγραμματιστικού μοντέλου βελτιστοποίησης

Ύστερα από την επισκόπηση των βιβλιογραφικών αναφορών, την περιγραφή του θεωρητικού υποβάθρου πάνω στο οποίο βασίστηκε η συγκεκριμένη Διπλωματική Εργασία και την περιγραφή των στατιστικών δεδομένων εκείνων για τα λεωφορεία που θεωρήθηκαν σημαντικά για τη διαχείρισή τους, στο παρόν υποκεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στην παρούσα Διπλωματική Εργασία. Πιο συγκεκριμένα, εξηγείται ο τρόπος με τον οποίο προέκυψε η αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου βελτιστοποίησης της κατανομής πόρων για τις ενέργειες που απαιτούνται στη διαχείριση του ανομοιογενούς στόλου λεωφορείων του Ο.Α.Σ.Α., περιγράφονται οι περιορισμοί, οι παραδοχές, οι συντελεστές βαρύτητας, οι παράμετροι και το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα του συγκεκριμένου μοντέλου.

##### 4.5.1 Γενικά

Ένα οργανισμός διαχείρισης στόλου λεωφορείων, χρειάζεται να είναι ικανός να **βελτιστοποιήσει τους αντικειμενικούς του σκοπούς**, που είναι η **μεγιστοποίηση των κερδών**, η **μεγιστοποίηση της μεταφοράς επιβατών** με ταυτόχρονη **ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας και συντήρησης**. Ένας οργανισμός αστικών συγκοινωνιών, για να βελτιστοποιήσει τη συνολική του λειτουργία πρέπει να είναι αποτελεσματικός. Για να γίνει, όμως, αποτελεσματικός, πρέπει να γίνει αποδοτικός.

Η αποδοτικότητα ενός οργανισμού διαχείρισης στόλου λεωφορείων περιλαμβάνει την τεχνική αποτελεσματικότητα των οχημάτων του, δηλαδή τη μεγιστοποίηση της μεταφορικής του ικανότητας με ένα δεδομένο επίπεδο πόρων (εργασία, τεχνικές υποδομές) και την αποτελεσματικότητα του κόστους, δηλαδή την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους για την παροχή δεδομένων υπηρεσιών.

##### 4.5.2 Μαθηματικό μοντέλο

Περνώντας πλέον στο βασικό στόχο της Διπλωματικής Εργασίας, δηλαδή στη βελτιστοποίηση της κατανομής πόρων, η οποία με τη σειρά της θα οδηγήσει και στη

βέλτιστη λειτουργία, συντήρηση, ηλικία αντικατάστασης του κάθε τύπου λεωφορείων του στόλου που διαχειρίζεται ο Ο.Α.Σ.Α., έγινε η προσπάθεια ανάπτυξης ενός μαθηματικού μοντέλου το οποίο βασίστηκε στις αρχές του προγραμματισμού. Το μοντέλο κατανομής πόρων που αναπτύχθηκε περιγράφει ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, και πιο συγκεκριμένα **ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού**, στο οποίο οι μεταβλητές αποφάσεις παίρνουν ακέραιες τιμές, όπως θα περιγράψει παρακάτω. Η αντικειμενική συνάρτηση που αναπτύχθηκε και επιδιώκεται να ελαχιστοποιηθεί είναι:

$$= \sum_{j=0}^{T-1} \sum_{k=1}^K v_k \cdot P_{jk} - \sum_{i=1}^{A_k} \sum_{j=0}^T \sum_{k=1}^K s_{ik} \cdot Y_{ijk} + \sum_{i=0}^{A_{k-1}} \sum_{j=0}^{T-1} \sum_{k=1}^K [a_{ijk} + m_{ik} + e_{ik}] \cdot u_{ik} \cdot X_{ijk}$$

#### Δείκτες:

- Τύπος λεωφορείου :  $k \in K = \{1, 2, \dots, K\}$
- Ηλικία τύπου  $k$  λεωφορείου :  $i \in A_k = \{0, 1, \dots, A_k\}$
- Χρονική περίοδος αποφάσεων :  $j \in T = \{0, 1, 2, \dots, T\}$

Ο **δείκτης  $i$**  αντιπροσωπεύει την ηλικία του κάθε τύπου λεωφορείου και παίρνει τιμές από 0 έως και 14, καθώς θεωρήθηκε μέγιστη ηλικία που μπορεί να φτάσει ένα λεωφορείο τα 15 έτη.

Ο **δείκτης  $k$**  εκφράζει τον τύπο τεχνολογίας κινητήρα του κάθε λεωφορείου και παίρνει τιμές από 1 έως και 4. Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν 4 τύποι λεωφορείων, οι οποίοι αντιστοιχίζονται με τον εξής τρόπο:

$k=1$  πετρελαιοκίνητα,

$k=2$  υβριδικά,

$k=3$  φυσικού αερίου,

$k=4$  ηλεκτροκίνητα/τρόλεϊ

Ο **δείκτης  $j$**  παίρνει τιμές από 0 έως και 19 και αντιπροσωπεύει τη χρονική περίοδο που θα ληφθεί η απόφαση για την αντικατάσταση συγκεκριμένου αριθμού, τύπου και ηλικίας λεωφορείων. Στη συγκεκριμένη Διπλωματική Εργασία γίνεται ανάλυση για μία χρονική περίοδο 20 ετών.

#### Μεταβλητές Απόφασης:

- $X_{ijk}$ : σύνολο  $i$ -ηλικίας,  $k$ -τύπου λεωφορείων που χρησιμοποιούνται το έτος  $j$
- $Y_{ijk}$ : σύνολο  $i$ -ηλικίας,  $k$ -τύπου λεωφορείων που παλούνται στην αρχή του έτους  $j$
- $P_{jk}$ : σύνολο των νέων λεωφορείων  $k$ -τύπου που αγοράζονται στην αρχή του έτους  $j$

Συνεπώς, ο συντελεστής **X632** για παράδειγμα μας καταδεικνύει τον αριθμό των υβριδικών ( $k=2$ ) λεωφορείων, ηλικίας έξι ετών ( $i=6$ ) που χρησιμοποιούνται το τρίτο έτος ( $j=3$ ) από την έναρξη του πλάνου.

Ο συντελεστής **Y893** για παράδειγμα μας καταδεικνύει τον αριθμό των λεωφορείων φυσικού αερίου ( $k=3$ ), ηλικίας 8 ετών ( $i=8$ ) που θα πουληθούν την αρχή του ένατου έτους ( $j=9$ ) από την έναρξη του πλάνου.

Ο συντελεστής **P84** για παράδειγμα μας καταδεικνύει τον αριθμό των καινούργιων ηλεκτρικών λεωφορείων ( $k=4$ ) που αγοράζονται το όγδοο έτος ( $j=8$ ) από την έναρξη του πλάνου.

Κατά συνέπεια προκύπτουν συνολικά για όλα τα λεωφορεία **1200 μεταβλητές X και Y**, οι οποίες παίρνουν ακέραιες τιμές από 0 (θεωρητική τιμή καθώς είναι αδύνατο να μη χρειάζονται λεωφορεία) έως 2000 που είναι ο μέγιστος αριθμός λεωφορείων που προέκυψε πως μπορεί να διαχειριστεί ο Ο.Α.Σ.Α. Αυτός ο αριθμός προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό των τύπων των λεωφορείων που είναι 4 με τον αριθμό της ηλικίας που έχει κάθε λεωφορείο που είναι 15 και τον αριθμό των ετών πραγματοποίησης των ενεργειών που είναι 20 ( **$20*15*4=1200$** ). Επιπλέον, προκύπτουν συνολικά για όλα τα λεωφορεία **80 μεταβλητές P**, οι οποίες παίρνουν και αυτές ακέραιες τιμές από 0 έως και 2000 (θεωρητική τιμή). Αυτός ο αριθμός προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό των τύπων των λεωφορείων που είναι 4 με τον αριθμό των ετών πραγματοποίησης των ενεργειών που είναι 20 ( **$20*4=80$** ). Στο σύνολο αναλύονται **2480 μεταβλητές**.

**Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης** καθώς σε αυτή εισάγονται τα κόστη αγοράς, πώλησης, λειτουργίας και συντήρησης μετά την ολοκλήρωση των ενεργειών αντικατάστασης. Έτσι ζητούμενο είναι η ελαχιστοποίηση του συνόλου των δαπανών των λεωφορείων και όχι το αντίθετο.

#### 4.6 Περιγραφή Παραμέτρων, Περιορισμών και Υποθέσεων του μοντέλου

##### 4.6.1. Συντελεστές που εισάγονται στην Αντικειμενική Συνάρτηση

Όπως διευκρινίστηκε και παραπάνω στο πρόβλημα εισάγονται **τρεις μεταβλητές απόφασης**, οι οποίες παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης και στον καθορισμό των πραγματοποιήσιμων ενεργειών

(αγορά, πώληση, λειτουργία λεωφορείων) μετά την επίλυση του κάθε σεναρίου. Οι υπόλοιπες παράμετροι που εισάγονται στην Αντικειμενική Συνάρτηση είναι οι εξής:

**$v_k$  : κόστος αγοράς τύπου  $k$  λεωφορείου**

Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για το κόστος αγοράς κάθε λεωφορείου για το βασικό σενάριο βελτιστοποίησης προέκυψαν από το μέσο όρο των τιμών που βρέθηκαν σε κάθε μελέτη. Όπως παρατηρήθηκε το κόστος αγοράς καινούργιου λεωφορείου έχει σημαντικές διακυμάνσεις ανάλογα με τον τύπο, το μέγεθος, την μάρκα, τη χώρα προέλευσης καθώς και τη χώρα λειτουργίας του αφού οι φόροι υπεισέρχονται στη διαμόρφωση της τιμής.

**$-o_{ijk} = f_{cj} / f_{ik}$  : κόστος ενέργειας κάθε λεωφορείου**

Σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του κόστους λειτουργίας ενός λεωφορείου έχει η αποδοτικότητα του καυσίμου που χρησιμοποιεί ο κινητήρας του. Η συγκεκριμένη παράμετρος προκύπτει από τη διαίρεση της μεταβλητής  $f_{cj}$ , η οποία δηλώνει την τιμή του καυσίμου κάθε χρόνο με μονάδα μέτρησης €/ltr ή €/kwh, με τη μεταβλητή  $f_{ik}$ , η οποία δηλώνει την αποδοτικότητα του εκάστοτε καυσίμου για κάθε τύπο και ηλικία λεωφορείου με μονάδα μέτρησης χλμ/l ή χλμ/kwh.

**$-s_{ik}$ : έσοδα από την πώληση κάθε λεωφορείου**

Στην Αντικειμενική Συνάρτηση εισήχθη η παράμετρος που προσδιορίζει τα έσοδα που έχει ο Ο.Α.Σ.Α. από την πώληση του κάθε λεωφορείου αφού πρώτα χρησιμοποιηθεί όσο κριθεί αναγκαίο. Οι παραδοχές που έγιναν για τη διαμόρφωση της τιμής πώλησης αναφέρονται παρακάτω.

**$m_{ik}$ : κόστος συντήρησης για κάθε λεωφορείου**

Ένας παράγοντας που έχει σημαντική βαρύτητα στην απόφαση για την αντικατάσταση των λεωφορείων αλλά και για τη διαμόρφωση του κόστους είναι η συντήρησή τους. Από την έρευνα που έγινε στις διάφορες πηγές δεδομένων διαπιστώθηκαν αρκετές μεταβολές του κόστους συντήρησης, τόσο μεταξύ των διαφόρων τύπων λεωφορείων όσο και μεταξύ της ηλικίας τους.

**$e_{ik}$ : Εκπομπή καυσαερίων διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα**

Η ρύπανση του περιβάλλοντος και της ατμόσφαιρας από την εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα CO<sub>2</sub> από τις μηχανές των οχημάτων έχει απασχολήσει πολύ την παγκόσμια κοινότητα. Τα τελευταία χρόνια γίνεται μεγάλη προσπάθεια μείωσης των εκπομπών ρυπογόνων καυσαερίων κυρίως με την εφαρμογή ποινών σε όσα οχήματα δεν

ακολουθούν τους κανονισμούς για τα επιτρεπτά όρια εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα. Επειδή, στην Ελλάδα όπως και σε πολλές χώρες δεν υπάρχουν τέτοιου είδους πρόστιμα, η μεταβλητή  $e_{ik}$  χρησιμοποιήθηκε μόνο στην ανάλυση ευαισθησίας κατά την εφαρμογή κατάλληλων σεναρίων.

#### **$u_{ik}$ : Διανυθέντα χιλιόμετρα κάθε λεωφορείου**

Η συγκεκριμένη παράμετρος υποδεικνύει τη χιλιομετρική χρήση του κάθε τύπου και ηλικίας λεωφορείου ετησίως. Κατά την εφαρμογή διάφορων σεναρίων η παράμετρος αυτή μπορεί να μένει σταθερή ή και να μεταβάλλεται γραμμικά για την εξαγωγή πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Περαιτέρω ανάλυση των σεναρίων μεταβολής της παραμέτρου θα γίνει παρακάτω.

#### **$h_{ik}$ : αρχικός αριθμός λεωφορείων**

Η μεταβλητή αυτή μας δείχνει τον αριθμό των υπαρχόντων λεωφορείων τη στιγμή που ξεκινάει η ανάλυση του μοντέλου βελτιστοποίησης, δηλαδή το έτος 0.

### 4.6.2 Περιορισμοί

Στο μοντέλο βελτιστοποίησης πέρα από την αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιούνται και κάποιοι βασικοί περιορισμοί οι οποίοι δίνουν ρεαλιστική υπόσταση στο πρόβλημα και διευκολύνουν την επίλυση.

#### **1) Περιορισμός Διαθέσιμου Κεφαλαίου**

Αρχικά υπάρχει ο **περιορισμός του αρχικού κεφαλαίου**. Προκειμένου να είναι ελεγχόμενη η αγορά νέων λεωφορείων εισήχθη ο συγκεκριμένος περιορισμός. Ακριβή δεδομένα για το ποσό του διαθέσιμου προϋπολογισμού που διαθέτει ο Ο.Α.Σ.Α. για την αγορά νέων λεωφορείων δεν βρέθηκαν. Συνεπώς επιλύεται το πρόβλημα



βελτιστοποίησης για **διαφορετικά σενάρια προϋπολογισμού** με σκοπό να μην υπάρξει αδυναμία εύρεσης λύσης.

#### ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

$$\sum_{k=1}^{A_{k-1}} v_k \cdot P_{jk} \leq b_j \quad \forall j \in \{0,1, \dots, T-1\}$$

- $v_k$  : κόστος αγοράς τύπου  $k$  bus
- $P_{jk}$ : το σύνολο των νέων λεωφορείων  $k$ -τύπου που αγοράζονται στην αρχή του έτους  $j$
- $b_j$ : προϋπολογισμός για αγορά νέων λεωφορείων κάθε έτος

#### 2) Περιορισμός Χρήσης και Αριθμού Λεωφορείων

Για την κάλυψη της επιβατικής ζήτησης, είναι απαραίτητο τα λεωφορεία να διανύουν συγκεκριμένες χιλιομετρικές αποστάσεις. Από τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν προέκυψε πως ένα λεωφορείο διανύει το χρόνο περίπου από 40.000 έως 70.000 χιλιόμετρα, ποσότητα που μπορεί να μεταβάλλεται με τον τύπο και την ηλικία του λεωφορείου. Επίσης, ο **μέγιστος αριθμός λεωφορείων** που μπορεί να διαχειριστεί ο Ο.Α.Σ.Α. είναι **2000**. Ενώ, ο **ελάχιστος αριθμός λεωφορείων** που πρέπει να είναι στη διάθεση του, για την αντιμετώπιση απρόβλεπτων καταστάσεων και την κάλυψη της επιβατικής ζήτησης είναι **1000**. Ο περιορισμός του συνολικού αριθμού των λεωφορείων παρόλο που φαίνεται να επικαλύπτει αυτόν της χιλιομετρικής χρήσης, κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή του καθώς θα μπορούσε να καλυφθούν οι χιλιομετρικές ανάγκες από μικρό αριθμό λεωφορείων που θα αδυνατούσαν να καλύψουν την ανάγκη της επιβατικής κίνησης. Το αντίστροφο συμβαίνει με τον περιορισμό της χιλιομετρικής χρήσης των λεωφορείων. Σύμφωνα με τα δεδομένα που συλλέχθηκαν, τα λεωφορεία του Ο.Α.Σ.Α. πρέπει να καλύπτουν ετησίως 70.000.000 χιλιόμετρα το οποίο είναι και το κατώτερο όριο του περιορισμού χιλιομετρικής χρήσης. Σε περίπτωση μη ύπαρξης του περιορισμού θα υπήρχε σφάλμα στον υπολογισμό του μαθηματικού μοντέλου καθώς το γινόμενο του ελάχιστου αριθμού λεωφορείων (1000) με τη χιλιομετρική χρήση του καθενός (50.000÷55.000) θα είχε ως αποτέλεσμα 50.000.000÷55.000.000 χιλιόμετρα από το σύνολο των λεωφορείων ετησίως, αριθμός αρκετά μικρότερος από το κατώτερο όριο του περιορισμού (70.000.000).

## 2α) ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ ΧΙΛΙΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΝ

$$\sum_{i=0}^{A_{k-1}} \sum_{k=1}^K X_{ijk} \cdot u_{ik} \geq d_j \quad \forall j \in \{0,1, \dots, T\}$$

- $X_{ijk}$ : σύνολο  $i$ -ηλικίας,  $k$ -τύπου λεωφορείων που χρησιμοποιούνται το έτος  $j$
- $u_{ik}$ : χιλιόμετρα που διανύονται από  $i$ -ηλικίας,  $k$ -τύπου λεωφορείων
- $d_j = 70.000.000$  το κατώτερο όριο χιλιομέτρων που πρέπει να διανύονται το έτος

## 2β) ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΡΙΘΜΟΥ ΛΕΩΦΟΡΕΙΩΝ

$$1000 \leq \sum_{i=0}^{A_{k-1}} \sum_{k=1}^K X_{ijk} \cdot u_{ik} \leq 2000 \quad \forall j \in \{0,1, \dots, T\}$$

- $X_{ijk}$ : σύνολο  $i$ -ηλικίας,  $k$ -τύπου λεωφορείων που χρησιμοποιούνται το έτος  $j$
- $u_{ik}$ : χιλιόμετρα που διανύονται από  $i$ -ηλικίας,  $k$ -τύπου λεωφορείων

## 3) Περιορισμός Καινούργιων Λεωφορείων

Για την σωστή επίλυση του μοντέλου βελτιστοποίησης εισήχθη ο περιορισμός σχετικά με τη χρήση των καινούργιων λεωφορείων σύμφωνα με τον οποίο όσα καινούργια λεωφορεία αγοράζονται οποιαδήποτε χρονική στιγμή πρέπει να χρησιμοποιηθούν κατευθείαν. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η άσκοπη αγορά λεωφορείων.

### Περιορισμός Καινούργιων Λεωφορείων

$$P_{jk} = X_{0jk} \quad \forall j \in \{1,2, \dots, T\}$$

- $P_{jk}$ : σύνολο  $k$ -τύπου λεωφορείων που αγοράζονται το έτος  $j$
- $X_{0jk}$ : σύνολο καινούργιων λεωφορείων  $k$ -τύπου που χρησιμοποιούνται το έτος  $j$

#### **4) Ειδική περίπτωση του παραπάνω περιορισμού Καινούργιων Λεωφορείων**

Για την περίπτωση του πρώτου έτους της ανάλυσης του μοντέλου βελτιστοποίησης ( $j=0$ ), ο παραπάνω περιορισμός μετατρέπεται, καθώς ο αριθμός των καινούργιων λεωφορείων  $i=0$  που χρησιμοποιούνται ισούται με το άθροισμα των λεωφορείων που αγοράστηκαν το πρώτο έτος  $P_{0k}$  και όσων καινούργιων λεωφορείων περιέχονται στον αρχικό στόλο  $h_{0k}$ . Αυτό συμβαίνει διότι έγινε η θεώρηση πως τα καινούργια λεωφορεία ( $i=0$ ) που έχει στη διάθεσή του ο Ο.Α.Σ.Α. το πρώτο έτος ανάλυσης του μοντέλου ( $j=0$ ) περιέχονται καινούργια λεωφορεία που όχι μόνο αγοράστηκαν, αλλά προϋπήρχαν κιάλας στον αρχικό στόλο. Για τα επόμενα χρόνια ισχύει ο γενικός τύπος παραπάνω.

#### **Περιορισμός Καινούργιων Λεωφορείων για το 1<sup>ο</sup> έτος**

$$P_{0k} + h_{0k} = X_{00k} \quad \forall k \in K$$

- $P_{0k}$ : σύνολο k-τύπου λεωφορείων που αγοράζονται το έτος 0
- $h_{0k}$ : σύνολο k-τύπου λεωφορείων ηλικίας 0 που υπάρχουν στον αρχικό στόλο
- $X_{00k}$ : σύνολο k-τύπου καινούργιων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται το έτος 0

#### **5) Περιορισμός Αρχικού στόλου λεωφορείων**

Απαραίτητος περιορισμός για την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης αποτελεί ο καθορισμός του αρχικού στόλου. Με τον όρο "αρχικός στόλος" εννοείται το σύνολο των λεωφορείων που διαθέτει ο Ο.Α.Σ.Α. το έτος 0 ή αλλιώς το πρώτο έτος που ξεκινάει η ανάλυση του προβλήματος. Αυτό το σύνολο περιέχει τα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται το 1<sup>ο</sup> έτος ( $X_{10k}$ ) και τα λεωφορεία που θα πουληθούν κατά τη διάρκεια του 1<sup>ου</sup> έτους ( $Y_{10k}$ ). Αξίζει να διευκρινιστεί σε αυτό το σημείο πως ο συγκεκριμένος περιορισμός ισχύει για τα λεωφορεία με  $i \geq 1$  καθώς όπως θα αναφερθεί και παρακάτω δεν πωλούνται καινούργια λεωφορεία ( $Y_{0jk} = 0$ ) και για τα καινούργια λεωφορεία που προϋπάρχουν στο στόλο έχει οριστεί ο 4<sup>ος</sup> περιορισμός παραπάνω ( $P_{0k} + h_{0k} = X_{00k}$ ).

### Περιορισμός αρχικού στόλου

$$X_{i0k} + Y_{i0k} = h_{ik} \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, A_k\} \quad \forall k \in K$$

- $X_{i0k}$ : σύνολο k-τύπου, i-ηλικίας λεωφορείων που χρησιμοποιούνται το έτος 0
- $Y_{i0k}$ : σύνολο k-τύπου, i-ηλικίας λεωφορείων που πωλούνται στην αρχή του έτος 0
- $h_{ik}$ : σύνολο i-ηλικίας, k-τύπου λεωφορείων που υπάρχουν στον αρχικό στόλο

### 6) Περιορισμός για την επαναχρησιμοποίηση ή την πώληση των λεωφορείων

Για την αποτελεσματική και λειτουργική διαχείριση του στόλου λεωφορείων κρίνεται απαραίτητη η διαδικασία κατά την οποία όλα τα λεωφορεία που έχει στη διάθεσή του ο Ο.Α.Σ.Α. χρησιμοποιούνται κατάλληλα. Για αυτό το λόγο εισήχθη ο συγκεκριμένος περιορισμός, ο οποίος αναγκάζει όσα λεωφορεία χρησιμοποιούνται κάποιο έτος να χρησιμοποιούνται ξανά το επόμενο έτος ή να πωλούνται εφόσον αυτό κρίνεται απαραίτητο μετά την ανάλυση του αλγόριθμου βελτιστοποίησης. Με αυτό τον τρόπο δεν μένει κανένα λεωφορείο αχρησιμοποίητο οποιοδήποτε έτος ανάλυσης. Και αυτός ο περιορισμός ισχύει προφανώς για  $i \geq 1$  και  $j \geq 1$ , αφού για τα καινούργια λεωφορεία το 1<sup>ο</sup> έτος ανάλυσης ισχύει ο 4<sup>ος</sup> περιορισμός που αναφέρθηκε παραπάνω ( $P_{0k} + h_{0k} = X_{00k}$ ).

### Περιορισμός επαναχρησιμοποίηση ή μη των λεωφορείων

$$X_{(i-1)(j-1)k} = X_{ijk} + Y_{ijk} \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, A_k\} \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, T\} \quad \forall k \in K$$

- $X_{(i-1)(j-1)k}$ : σύνολο k-τύπου, i-1 ηλικίας λεωφορείων που χρησιμοποιούνται το έτος j-1
- $X_{ijk}$ : σύνολο k-τύπου, i-ηλικίας λεωφορείων που χρησιμοποιούνται το έτος j
- $Y_{ijk}$ : σύνολο k-τύπου, i-ηλικίας λεωφορείων που πωλούνται το έτος j

### 7) Περιορισμός μέγιστης ηλικίας λεωφορείου

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η μέγιστη ηλικία μέχρι την οποία μπορεί να βρίσκεται εν ενεργεία το κάθε λεωφορείο εισήχθη ο συγκεκριμένος περιορισμός. Στη Διπλωματική Εργασία επιλέχθηκε ως μέγιστη ηλικία μέχρι την οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοσδήποτε τύπος λεωφορείου είναι τα 15 έτη, καθώς σύμφωνα με τα δεδομένα

βρέθηκε πως μετά από αυτή την ηλικία, η λειτουργία και η συντήρηση των λεωφορείων είναι εξαιρετικά δαπανηρές.

$$X_{A_k j} = 0 \quad \forall j \in \{0, 1, \dots, T\}, \forall k \in K$$

- $X_{A_k j}$ : σύνολο  $k$ -τύπου,  $A_k$ -ηλικίας λεωφορείων που χρησιμοποιούνται το έτος  $j$

#### **8) Περιορισμός μη πώλησης καινούργιων λεωφορείων**

Ο τελευταίος περιορισμός σχετικά με την αγορά, την πώληση-αντικατάσταση και τη λειτουργία των λεωφορείων είναι ο παρακάτω, ο οποίος δεν επιτρέπει την πώληση καινούργιων λεωφορείων, δηλαδή με ηλικία  $i=0$ . Αυτός ο περιορισμός έχει νόημα καθώς θα ήταν ανούσιο να υπήρχε πώληση λεωφορείων που μόλις αγοράστηκαν πριν προλάβουν να χρησιμοποιηθούν. Κανένας από τους παραπάνω περιορισμούς δεν κάλυπτε αυτήν την περίπτωση αφού ίσχυαν για  $j \geq 1$ .

$$Y_{0jk} = 0 \quad \forall j \in \{0, 1, \dots, T\}, \forall k \in K$$

- $Y_{0jk}$ : σύνολο καινούργιων λεωφορείων,  $k$ -τύπου που πωλούνται το έτος  $j$

#### **9) Περιορισμός ακέραιων και θετικών μεταβλητών**

Καθώς η επίλυση του μοντέλου βελτιστοποίησης έγινε με τη χρήση γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού ήταν απαραίτητη συνθήκη να είναι οι μεταβλητές ακέραιοι και μη αρνητικοί αριθμοί, ώστε να έχουν νόημα τα αποτελέσματα.

- $P_{jk}, X_{ijk}, Y_{ijk} \in I = \{0, 1, 2, \dots\}$

## Εφαρμογή Μεθοδολογίας-Αποτελέσματα

---

### 5.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο περιλαμβάνει την αναλυτική περιγραφή της εφαρμογής της μεθοδολογίας, καθώς και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της Διπλωματικής Εργασίας. Σημαντικό τμήμα του κεφαλαίου καταλαμβάνει το εδάφιο που αφορά στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων και διακρίνεται στις τρεις ακόλουθες φάσεις:

- Παρουσίαση των εξαγόμενων στοιχείων
- Περιγραφή των αποτελεσμάτων
- Εξήγηση των αποτελεσμάτων

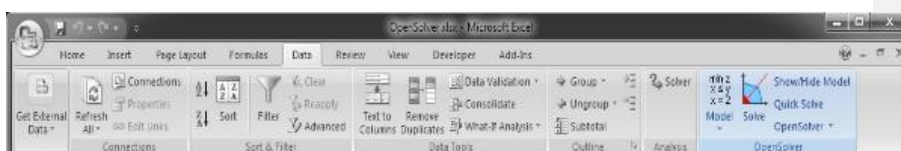
Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται με τη βοήθεια πινάκων, αλλά και σχετικών διαγραμμάτων που επιτρέπουν τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων.

Το μοντέλο εφαρμόζεται για σταθερό ανά έτος προϋπολογισμό και φυσικά σταθερό χρονικό πλάνο και μέγιστη ηλικία των λεωφορείων. Αρχικά για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε ένα βασικό σενάριο με συγκεκριμένες παραδοχές για τις παραμέτρους. Κατ'επέκταση, εξετάζονται διάφορα σενάρια μεταβολής των παραμέτρων και μελετάται η επίδρασή τους στα αποτελέσματα του προγράμματος συντήρησης. Τα σενάρια αυτά είναι τα εξής:

- μεταβάλλεται το αρχικό κόστος αγοράς των λεωφορείων
- μεταβάλλονται οι τιμές των καυσίμων που χρησιμοποιούν οι κινητήρες των λεωφορείων για τη λειτουργία τους
- εισέρχεται ως παράμετρος η ύπαρξη προστίμου για την εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα
- μεταβάλλεται ο προϋπολογισμός που διατίθεται ανά έτος για την αγορά καινούργιων λεωφορείων

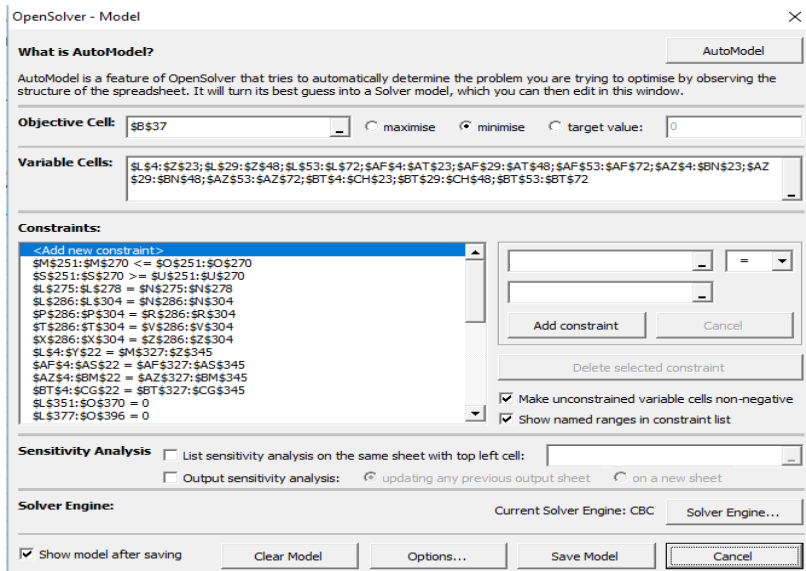
## 5.2 Προγραμματιστική Εφαρμογή Μοντέλου Βελτιστοποίησης μέσω Excel – Open Solver

Το μοντέλο βελτιστοποίησης και η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης βρίσκουν εφαρμογή μέσω εργαλείου προγραμματισμού σχεδιασμένο για το λογισμικό Microsoft Excel. Το εργαλείο αυτό ονομάζεται Open Solver και είναι βασισμένο στη γλώσσα προγραμματισμού C++ και είναι σχεδιασμένο για την επίλυση μεγάλων γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης και προβλημάτων ακέραίου προγραμματισμού. Δεν υπάρχουν τεχνητοί περιορισμοί στην εφαρμογή του συγκεκριμένου εργαλείου και συνεπώς ο αριθμός των δεδομένων που εισάγονται στο πρόβλημα μπορεί να είναι πολύ μεγάλος. Το εργαλείο Open Solver εισάγεται στο Microsoft Excel ως προσθήκη κάτω από το Data Section. Η προσθήκη του εργαλείου φαίνεται στο παρακάτω εικονίδιο:



**Σχήμα 5.1:** Προσθήκη Open Solver στο Microsoft 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 5.2:** Το πλαίσιο διαλόγου του Open Solver για το πρόβλημα της κατανομής πόρων

Για την ανεύρεση της άριστης λύσης στο πρόβλημα ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

- **Objective cell:** Εισάγεται το κελί που αντιστοιχεί στην αντικειμενική συνάρτηση του οποίου στη συγκεκριμένη περίπτωση επιζητούμε ελαχιστοποίηση, το κελί αυτό είναι το B37 και αποτελεί ένα SUMPRODUCT των κελιών που αντιπροσωπεύουν τα  $X_{ijk}$ , τα  $Y_{ijk}$ , τα  $P_{jk}$ . 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 επιδιωκόμενο αποτέλεσμα (μεγιστοποίηση, ελαχιστοποίηση και ορισμός συγκεκριμένης τιμής). Στη συγκεκριμένη Διπλωματική Εργασία ελαχιστοποιείται η αντικειμενική συνάρτηση και για το λόγο αυτό ενεργοποιείται η επιλογή Min.
- **Variable cells:** Εισάγονται τα κελιά που αντιστοιχούν στις μεταβλητές απόφασης. Αυτά είναι τα  $X_{ijk}$ , τα  $Y_{ijk}$ , τα  $P_{jk}$ , τα οποία αριθμούνται σε 1280 και παίρνουν ακέραιες

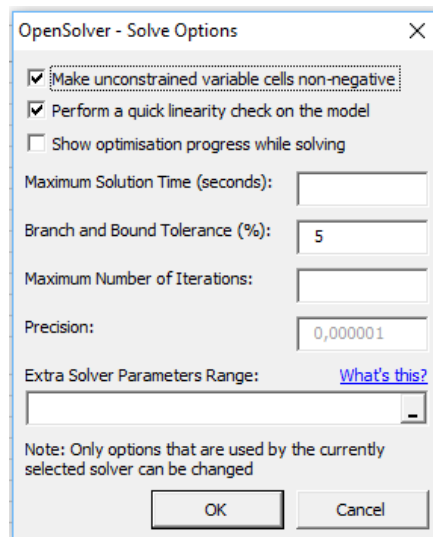


τιμές από 0 μέχρι 1200, αντιπροσωπεύοντας αντίστοιχα τον αριθμό των διαφόρων τύπων και ηλικίας λεωφορείων που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται, πωλούνται οποιαδήποτε χρονική στιγμή (ανά έτος) στο πλάνο σχεδιασμού των 20 ετών.

- **Constraints:** Εισάγονται οι περιορισμοί του προβλήματος. Πατώντας το κουμπί Add εμφανίζεται ο διάλογος εισαγωγής περιορισμών, με τη βοήθεια του οποίου καταστρώνονται οι περιορισμοί του προβλήματος. (Σχήμα 5.3)
- **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 5.4)



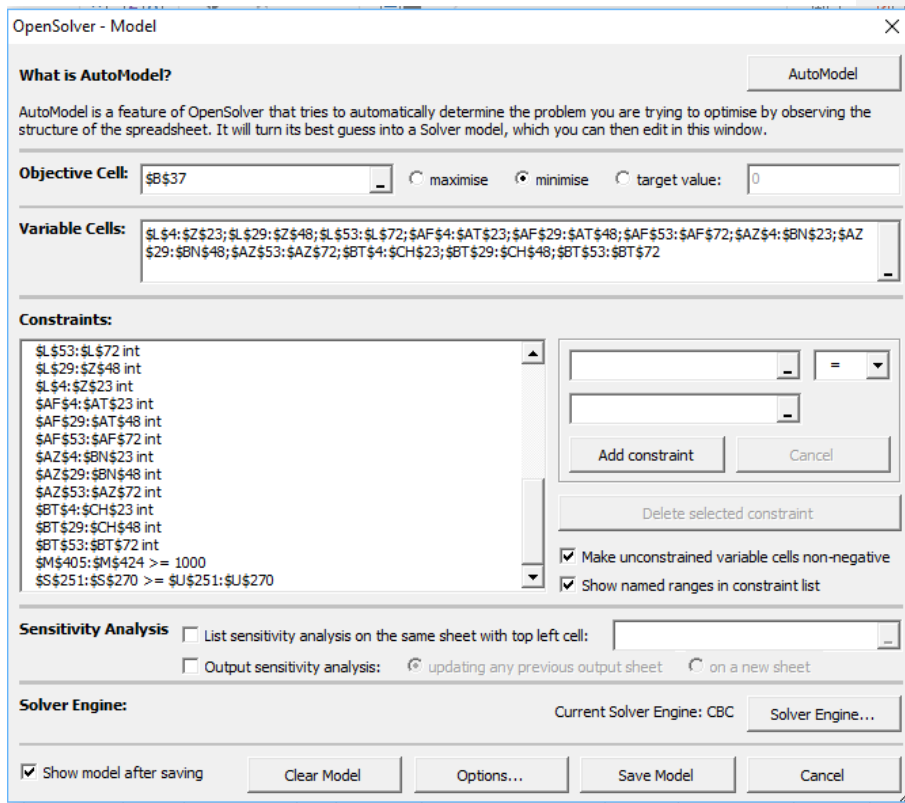
Σχήμα 5.3: Το πλαίσιο διαλόγου εισαγωγής περιορισμών



Σχήμα 5.4: Το πλαίσιο διαλόγου των παραμέτρων του Excel Solver

Μετά την εισαγωγή των απαραίτητων πληροφοριών και πατώντας αρχικά την επιλογή Save Model ώστε να σωθεί η εικόνα των συνθηκών και έπειτα την επιλογή Solve, με την βοήθεια του Open Solver επιλύθηκε το πρόβλημα εφαρμόζοντας μία επαναληπτική μαθηματική διαδικασία, ώστε τα κελιά που αντιστοιχούν στα  $X_{ijk}$ , τα  $Y_{ijk}$ , τα  $P_{jk}$  να παίρνουν τις βέλτιστες τιμές.

Ακολουθεί ένα παράδειγμα από μία επίλυση του μοντέλου για το πώς στήθηκε στη συγκεκριμένη περίπτωση και τι αποτελέσματα προέκυψαν:



**Σχήμα 5.5:** Εικόνα εισαγωγής αντικειμενικής συνάρτησης και περιορισμών στο συγκεκριμένο πρόβλημα

Στη συγκεκριμένη περίπτωση επίλυσης ενεργοποιείται η εντολή minimize καθώς επιζητείται ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης.

| ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ |             |             |          |             |             |
|-------------------------|-------------|-------------|----------|-------------|-------------|
|                         | k=1         | k=2         | k=3      | k=4         | SUM         |
| 1ος όρος                | 48963637,76 | 360094603   | 24384663 | 0           | 433442904,4 |
| 2ος όρος                | 72482456,68 | 28935839    | 31219031 | 31070948,69 | 163708274,9 |
| 3ος όρος                | 99993361,3  | 363432726   | 50958900 | 16651995,35 | 531036983,5 |
| Z                       | min         | 800771613,1 |          |             |             |

**Σχήμα 5.6:** Η τελική μορφή του φύλλου εργασίας με τη βέλτιστη λύση του προβλήματος κατανομής πόρων

|       |    | =ηλικία |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |             |
|-------|----|---------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------------|
| i=1   | xj | 0       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | ΣΥΝΟΛΟ      |
| μήνας | 0  | 40      | 0  | 0  | 15 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 285         |
|       | 1  | 0       | 40 | 0  | 0  | 15 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 0  | 0  | 0  | 0  | 285         |
|       | 2  | 0       | 0  | 40 | 0  | 0  | 15 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 0  | 0  | 0  | 285         |
|       | 3  | 60      | 0  | 0  | 40 | 0  | 0  | 15 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 0  | 0  | 355         |
|       | 4  | 60      | 60 | 0  | 0  | 40 | 0  | 0  | 15 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 0  | 415         |
|       | 5  | 100     | 60 | 60 | 0  | 40 | 0  | 0  | 0  | 15 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 0  | 475         |
|       | 6  | 0       | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0           |
|       | 7  | 0       | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0           |
|       | 8  | 0       | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0           |
|       | 9  | 0       | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0           |
|       | 10 | 0       | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0           |
|       | 11 | 0       | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0           |
|       | 12 | 0       | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0           |
|       | 13 | 0       | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0           |
|       | 14 | 0       | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0           |
|       | 15 | 0       | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0           |
|       | 16 | 0       | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0           |
|       | 17 | 0       | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0           |
|       | 18 | 0       | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0           |
|       | 19 | 0       | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0           |
|       |    |         |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | ΣΥΝΟΛΟ 2130 |

**Σχήμα 5.7:** Απόσπασμα τελικής μορφής εργασίας με τα αποτελέσματα των χρησιμοποιούμενων λεωφορείων τύπου 1 (πετρελαιοκίνητα)

Έπειτα από την ενεργοποίηση της εντολής SOLVE ο πίνακας των κελιών γεμίζει με ακέραιους θετικούς αριθμούς και το κελί της αντικειμενικής συνάρτησης λαμβάνει τη βέλτιστη τιμή ελαχιστοποίησης.

#### 5.4 Αποτελέσματα του μοντέλου βελτιστοποίησης

Προκειμένου να εξαχθούν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας, το μοντέλο βελτιστοποίησης στο open solver επιλύεται για διάφορα σενάρια, τα οποία προκύπτουν για διαφορετικές τιμές στο κόστος αγοράς των λεωφορείων, διαφορετικές τιμές των καυσίμων, το κόστος αγοράς των λεωφορείων, το

διαθέσιμο προϋπολογισμό του έτους, καθώς και το επιπρόσθετο κόστος από την εκπομπή καυσαερίου CO<sub>2</sub>.

#### 5.4.1 Αποτελέσματα βασικού σεναρίου

Αρχικά εφαρμόζεται το βασικό σενάριο στο οποίο έχουν χρησιμοποιηθεί οι μέσες τιμές των παραμέτρων που προέκυψαν από την ανάλυση των δεδομένων και όπου χρειάστηκε έγιναν θεωρήσεις για τη μεταβολή τους, όπως φαίνεται παρακάτω:

Πιο συγκεκριμένα για την παράμετρο που αφορά τη χιλιομετρική απόσταση που διανύουν τα λεωφορεία ανά έτος επιλέχθηκε η εξίσωση  $u_{ik} = (\text{μέσος όρος χιλιομέτρων ανά έτος}) - 500 * i$ , όπου  $i$  η ηλικία του λεωφορείου.

Η παράμετρος που υπολογίζει τα έσοδα από την πώληση ενός λεωφορείου είναι συνάρτηση της ηλικίας και της χρήσης του λεωφορείου, σύμφωνα με την οποία, η αξία του λεωφορείου μειώνεται εκθετικά. Από τη βιβλιογραφία επιλέχθηκε η χρήση της παρακάτω εξίσωσης  $s_{ik} = v_k * (1 - \theta_k)^i$ , όπου  $v_k$  το κόστος αγοράς του λεωφορείου,  $i$  η ηλικία του λεωφορείου και  $\theta_k$  ένας μειωτικός συντελεστής ανάλογα με τη χιλιομετρική χρήση του λεωφορείου, ο οποίος λήφθηκε ίσος με 15% (EC 2010).

Σχετικά με την παράμετρο του κόστους συντήρησης επιλέχθηκε γραμμική αύξηση κατά **2,5%** για τα πετρελαιοκίνητα και **1,5%** για τις υπόλοιπες τρεις κατηγορίες λεωφορείων, θεώρηση που προέκυψε από τη βιβλιογραφία (Motavalli 2010).

Το κόστος ενέργειας που καταναλώνεται από τα λεωφορεία υπολογίζεται ως εξής :

$$O_{ijk} = \frac{\text{κόστος καυσίμου} \left( \frac{\text{ευρώ}}{\text{λίτρο}} \text{ ή } \frac{\text{ευρώ}}{\text{kwh}} \right)}{\text{αποδοτικότητα κινητήρα} \left( \frac{\text{χλμ}}{\text{λίτρο}} \text{ ή } \frac{\text{χλμ}}{\text{kwh}} \right)}$$

Κρίθηκε όμως σκόπιμο σύμφωνα με την ανάλυση των δεδομένων να μειώνεται γραμμικά η αποδοτικότητα του κινητήρα του κάθε λεωφορείου αναλογικά με την ηλικία του κατά **1%** (Clark et al. 2007). Προκύπτει λοιπόν πως η αποδοτικότητα του κινητήρα ισούται με την αρχική μείον το 1% της αρχικής επί την ηλικία που βρίσκεται το λεωφορείο.

Επίσης ο προϋπολογισμός για κάθε έτος επιλέχθηκε να είναι τα **100.000.000 €** ώστε να μην εμποδίζεται η επίλυση του προβλήματος, παρόλο που το ποσό αυτό ίσως δεν είναι αρκετά αντιπροσωπευτικό.

Σε ότι αφορά τον αρχικό στόλο των λεωφορείων, χρησιμοποιούνται ενδεικτικές τιμές για το σύνολο των λεωφορείων που υπάρχουν στη διάθεση του Ο.Α.Σ.Α. Πιο συγκεκριμένα,

υπάρχουν 600 πετρελαιοκίνητα, 375 υβριδικά, 450 φυσικού αερίου, 225 ηλεκτροκίνητα με ισομοιρασμένες μεταξύ τους ηλικίες.

Αξίζει να τονιστεί ότι ο πίνακας  $X_{ijk}$  έχει στα κελιά του ως αποτέλεσμα τα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται κάθε έτος. Επειδή τα ίδια λεωφορεία που χρησιμοποιούνται ένα έτος μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν το επόμενο, το άθροισμα των κελιών ανά έτος έχει ως αποτέλεσμα το σύνολο των λεωφορείων κάθε ηλικίας που χρησιμοποιούνται το κάθε έτος. Αυτός ο αριθμός όμως δεν είναι ο αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια των 20ετών. Χρησιμοποιείται για αυτό το λόγο ο όρος λεωφορειοχρήσεις. Το σύνολο των κελιών του πίνακα  $X_{ijk}$  έχει ως αποτέλεσμα τις χρήσεις των λεωφορείων στο 20ετές πλάνο. Τα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται ισούνται με το άθροισμα των κελιών της πρώτης γραμμής (αρχικός στόλος) και των κελιών της πρώτης στήλης (λεωφορεία που αγοράζονται).

Παρακάτω παρουσιάζονται με μορφή πινάκων και διαγραμμάτων τα σύνολα και τα ποσοστά των τεσσάρων διαφορετικών τύπων λεωφορείων που αγοράζονται, πωλούνται και χρησιμοποιούνται καθώς και η ηλικία τους και η χρονική στιγμή που συμβαίνει η κάθε ενέργεια στην διάρκεια του 20ετούς πλάνου. Ενδεικτικά, παρουσιάζεται και η μορφή των πινάκων που περιέχουν τις μεταβλητές απόφασης για τα πετρελαιοκίνητα. Επίσης, καταγράφεται το τελικό κόστος για την κατανομή των πόρων που θα χρειαστεί ο Ο.Α.Σ.Α. για την πραγματοποίηση των ενεργειών.

**Πίνακας 5.1 :** Σύνολο πετρελαιοκίνητων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου

| έτος | ηλικία | ετήσια |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    | ΣΥΝΟΛΟ |             |
|------|--------|--------|----|----|----|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|--------|-------------|
|      |        | 0      | 1  | 2  | 3  | 4 | 5 | 6 | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 |        | 14          |
| 0    | 40     | 0      | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 5 | 40 | 40 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0      | 125         |
| 1    | 0      | 0      | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0 | 5  | 40 | 40 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0      | 85          |
| 2    | 0      | 0      | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0 | 0  | 5  | 40 | 40 | 0  | 0  | 0  | 0      | 85          |
| 3    | 0      | 0      | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 5  | 40 | 40 | 0  | 0  | 0      | 85          |
| 4    | 0      | 0      | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 5  | 40 | 40 | 0  | 0      | 85          |
| 5    | 0      | 0      | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 5  | 40 | 40 | 0      | 85          |
| 6    | 0      | 0      | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 5  | 40 | 0      | 45          |
| 7    | 0      | 0      | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0      | 0           |
| 8    | 0      | 0      | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0      | 0           |
| 9    | 0      | 0      | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0      | 0           |
| 10   | 0      | 0      | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0      | 0           |
| 11   | 0      | 0      | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0      | 0           |
| 12   | 0      | 0      | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0      | 0           |
| 13   | 0      | 0      | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0      | 0           |
| 14   | 0      | 0      | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0      | 0           |
| 15   | 80     | 0      | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0      | 80          |
| 16   | 71     | 80     | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0      | 151         |
| 17   | 0      | 71     | 80 | 0  | 0  | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0      | 151         |
| 18   | 0      | 0      | 71 | 80 | 0  | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0      | 151         |
| 19   | 0      | 0      | 0  | 71 | 80 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0      | 151         |
|      |        |        |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |        | ΣΥΝΟΛΟ 1279 |

**Πίνακας 5.2 :** Σύνολο πετρελαιοκίνητων λεωφορείων που πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου

| k=1 | γj | 0 | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7 | 8 | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | ΣΥΝΟΛΟ     |
|-----|----|---|----|----|----|----|----|----|---|---|----|----|----|----|----|----|------------|
| 0   | 0  |   | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 35 | 0 | 0 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 475        |
| 1   | 0  |   | 40 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 40         |
| 2   | 0  |   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0          |
| 3   | 0  |   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0          |
| 4   | 0  |   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0          |
| 5   | 0  |   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0          |
| 6   | 0  |   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 40         |
| 7   | 0  |   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 5  | 40 | 45         |
| 8   | 0  |   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0          |
| 9   | 0  |   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0          |
| 10  | 0  |   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0          |
| 11  | 0  |   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0          |
| 12  | 0  |   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0          |
| 13  | 0  |   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0          |
| 14  | 0  |   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0          |
| 15  | 0  |   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0          |
| 16  | 0  |   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0          |
| 17  | 0  |   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0          |
| 18  | 0  |   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0          |
| 19  | 0  |   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0          |
|     |    |   |    |    |    |    |    |    |   |   |    |    |    |    |    |    | ΣΥΝΟΛΟ 600 |

**Πίνακας 5.3 :** Σύνολο πετρελαιοκίνητων λεωφορείων που αγοράζονται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου

| k=1 | Pj | =0 ηλικία |
|-----|----|-----------|
|     |    | 0         |
|     |    | 1         |
|     |    | 2         |
|     |    | 3         |
|     |    | 4         |
|     |    | 5         |
|     |    | 6         |
|     |    | 7         |
|     |    | 8         |
|     |    | 9         |
|     |    | 10        |
|     |    | 11        |
|     |    | 12        |
|     |    | 13        |
|     |    | 14        |
|     |    | 15        |
|     |    | 16        |
|     |    | 17        |
|     |    | 18        |
|     |    | 19        |
|     |    | ΣΥΝΟΛΟ    |
|     |    | 151       |

**Πίνακας 5.4:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βασικού σεναρίου

|                   | τελ. κόστος     | χρησιμοποιούνται    |            |               |               | πωλούνται           |            |               |               | αγοράζονται         |            |               |               | ποσοστό των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |            |               |               | μ.ο. ηλικίας λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |            |               |               |
|-------------------|-----------------|---------------------|------------|---------------|---------------|---------------------|------------|---------------|---------------|---------------------|------------|---------------|---------------|---|------------|---------------|---------------|--|------------|---------------|---------------|
|                   |                 | πετρελαϊκό υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | ηλεκτροκίνητα | πετρελαϊκό υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | ηλεκτροκίνητα | πετρελαϊκό υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | ηλεκτροκίνητα | πετρελαϊκό υβριδικά                         | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | ηλεκτροκίνητα | πετρελαϊκό υβριδικά                          | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | ηλεκτροκίνητα |
| 1. ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ | € 1.006.657.050 | 276                 | 275        | 1183          | 627           | 600                 | 375        | 660           | 376           | 151                 | 0          | 793           | 417           | 12%   | 12%        | 50%           | 27%           | 6,4  | 10,2       | 7,0           | 7,8           |

**Πίνακας 5.5:** Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου

| ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ |                     |              |               |           |           |
|-------------------------|---------------------|--------------|---------------|-----------|-----------|
|                         | πετρελαϊκό υβριδικά | φυσικό αέριο | ηλεκτροκίνητα | ΣΥΝΟΛΟ    |           |
| 1ος όρος                | 28406343            | 0            | 238967364     | 209208646 | 476582353 |
| 2ος όρος                | 51932040            | 36286169     | 63480661      | 17880222  | 169579091 |
| 3ος όρος                | 71912720            | 67481201     | 389635898     | 170623970 | 699653789 |
| <b>ΤΕΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ</b>    | <b>1006657050</b>   |              |               |           |           |



**Σχήμα 5.8:** Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου





**Σχήμα 5.9:** Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου

Από τους παραπάνω πίνακες και διαγράμματα είναι χρήσιμο να αναφερθούν τα εξής στοιχεία:

- Για τα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται:
  - α) Κατά τη διάρκεια της 20ετίας το 50% είναι φυσικού αερίου, 26% ηλεκτροκίνητα και από 12% είναι τα υβριδικά και τα πετρελαιοκίνητα.
  - β) Το μεγαλύτερο μέσο όρο ηλικίας έχουν τα υβριδικά με 10,2 χρόνια και το μικρότερο τα πετρελαιοκίνητα με 6,4 χρόνια.
- Για τα λεωφορεία που πωλούνται:
  - α) Το 33% είναι λεωφορεία φυσικού αερίου, το 30% είναι πετρελαιοκίνητα, το 19% ηλεκτροκίνητα και το 18% υβριδικά
  - β) Τα περισσότερα πετρελαιοκίνητα (79%) πωλούνται το 1<sup>ο</sup> έτος έναρξης του πλάνου; όλα τα υβριδικά πωλούνται μέχρι και το 9<sup>ο</sup> έτος του πλάνου; όλα τα λεωφορεία φυσικού αερίου πωλούνται μέχρι το 10<sup>ο</sup> έτος του πλάνου; τα ηλεκτροκίνητα πωλούνται μέχρι και το 17<sup>ο</sup> έτος του πλάνου.
- Για τα λεωφορεία που αγοράζονται:
  - α) Αγορές πετρελαιοκίνητων λεωφορείων παρατηρείται πως συμβαίνουν μόνο τα έτη 16 και 17; μηδενικές αγορές πραγματοποιούνται στα υβριδικά λεωφορεία; συνεχόμενες αγορές λεωφορείων φυσικού αερίου

πραγματοποιούνται από το 4<sup>ο</sup> μέχρι και το 15<sup>ο</sup> έτος; ηλεκτροκίνητα λεωφορεία αγοράζονται μόνο τα έτη 2,3,7,8.

- β) Ποσοστιαία αγοράζονται κατά τη διάρκεια του πλάνου 58% λεωφορεία φυσικού αερίου, 31% ηλεκτροκίνητα, 11% πετρελαιοκίνητα και καθόλου υβριδικά.

Το τελικό κόστος που θα προκύψει για τη διαχείριση του στόλου λεωφορείων του Ο.Α.Σ.Α. στην περίοδο των 20 ετών ανέρχεται στα 1.006.657.050 €. Παράλληλα από το συγκεκριμένο πίνακα μπορούμε να εξάγουμε και συμπεράσματα για τα τελικά κόστη των διαφορετικών τύπων λεωφορείων από την αγορά τους (1<sup>ος</sup> όρος) και τη λειτουργία τους (3<sup>ος</sup> όρος), όπως και για τα τελικά κέρδη από την πώλησή τους (2<sup>ος</sup> όρος). Τα στοιχεία που χρήζουν αναφοράς είναι η **μηδενική αγορά υβριδικών λεωφορείων** και επομένως μηδενικό κόστος καθώς και το υψηλό κόστος αγοράς και χρήσης των λεωφορείων φυσικού αερίου και ηλεκτροκίνητων που δικαιολογείται καθώς αυτοί οι δύο τύποι λεωφορείων αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μέρος του στόλου.

#### 5.4.2 Αποτελέσματα για χαμηλό κόστος αγοράς πετρελαιοκίνητων λεωφορείων

Στο συγκεκριμένο σενάριο επιλέχθηκε ως υπόθεση το χαμηλό κόστος αγοράς πετρελαιοκίνητων λεωφορείων με μείωση 30% της αρχικής μέσης τιμής που είχε επιλεγεί στο βασικό σενάριο, από 236.841€ σε 165.789€. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι και οι περιορισμοί παραμένουν ίδιοι.

**Πίνακας 5.6:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου χαμηλού κόστους αγοράς πετρελαιοκίνητων

|  | τελ. κόστος     | χρησιμοποιούνται |          |            |               | πωλούνται       |          |            |               | αγοράζονται     |          |            |               | ποσοστό των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               | μ.ο. ηλικίας λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               |
|--|-----------------|------------------|----------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|---------------|---|----------|------------|---------------|--|----------|------------|---------------|
|  |                 | πετρελαιοκίνητα  | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                             | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                              | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα |
| 1. ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ                        | € 1.006.657.050 | 276              | 275      | 1183       | 627           | 600             | 375      | 660        | 376           | 151             | 0        | 793        | 417           | 12%   | 12%      | 50%        | 27%           | 6,4  | 10,2     | 7,0        | 7,8           |
| 2. Χαμηλό Κόστος Αγοράς Πετρελαιοκίνητων | € 1.002.843.197 | 660              | 275      | 516        | 994           | 670             | 375      | 450        | 639           | 574             | 0        | 126        | 784           | 27%   | 11%      | 21%        | 41%           | 3,9  | 10,6     | 8,5        | 7,7           |
| Μεταβολή από βασικό σενάριο              | -0,4%           | 139%             | 0%       | -56%       | 59%           | 12%             | 0%       | -32%       | 70%           | 280%            | x        | -84%       | 88%           | 131%  | -3%      | -58%       | 53%           | -38%   | 4%       | 21%        | -2%           |

**Πίνακας 5.7:** Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος αγοράς πετρελαιοκίνητων

| ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ |                   |          |              |               |           |
|-------------------------|-------------------|----------|--------------|---------------|-----------|
|                         | πετρελαιοκίνητα   | υβριδικά | φυσικό αέριο | ηλεκτροκίνητα | ΣΥΝΟΛΟ    |
| 1ος όρος                | 77353503          | 0        | 37170518     | 397565528     | 512089550 |
| 2ος όρος                | 46899161          | 41167026 | 30867252     | 29322195      | 148255634 |
| 3ος όρος                | 142992773         | 57412106 | 147242902    | 291361500     | 639009280 |
| <b>ΤΕΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ</b>    | <b>1002843197</b> |          |              |               |           |



**Σχήμα 5.10:** Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος αγοράς πετρελαιοκίνητων



**Σχήμα 5.11:** Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος αγοράς πετρελαιοκίνητων

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι χρήσιμο να αναφερθούν τα εξής στοιχεία:

- Για τα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται:
  - α) Το 62% είναι ηλεκτροκίνητα, το 18% είναι φυσικού αερίου, ενώ το 14% και 6% είναι πετρελαιοκίνητα και υβριδικά αντίστοιχα.
  - β) Το μεγαλύτερο μέσο όρο ηλικίας έχουν τα υβριδικά με 10,6 χρόνια και το μικρότερο τα πετρελαιοκίνητα με 3,9 χρόνια.
- Για τα λεωφορεία που πωλούνται:
  - α) Το 31% είναι πετρελαιοκίνητα, το 30% είναι ηλεκτροκίνητα, το 21% φυσικού αερίου και το 18% υβριδικά
  - β) Τα περισσότερα πετρελαιοκίνητα (77%) πωλούνται το 1<sup>ο</sup> έτος έναρξης του πλάνου; όλα τα υβριδικά πωλούνται μέχρι και το 9<sup>ο</sup> έτος του πλάνου; το 93% των λεωφορείων φυσικού αερίου πωλούνται μέχρι το 9<sup>ο</sup> έτος του πλάνου; τα ηλεκτροκίνητα πωλούνται καθ' όλη τη διάρκεια των 20 ετών του πλάνου.
- Για τα λεωφορεία που αγοράζονται:
  - α) Αγορές πετρελαιοκίνητων λεωφορείων παρατηρείται πως συμβαίνουν το 6<sup>ο</sup> έτος και από το 12<sup>ο</sup> έως και το 19<sup>ο</sup> έτος; μηδενικές αγορές πραγματοποιούνται στα υβριδικά λεωφορεία; αγορές λεωφορείων φυσικού αερίου πραγματοποιούνται από το 7<sup>ο</sup> μέχρι και το 11<sup>ο</sup> έτος; ηλεκτρικά λεωφορεία αγοράζονται από την έναρξη του πλάνου μέχρι το 8<sup>ο</sup> έτος με εξαίρεση το 6<sup>ο</sup> έτος.

- β) Ποσοστιαία αγοράζονται κατά τη διάρκεια του πλάνου 53% ηλεκτροκίνητα λεωφορεία, 39% πετρελαιοκίνητα, 8% φυσικού αερίου και καθόλου υβριδικά.

**Συγκριτικά** με το βασικό σενάριο τα στοιχεία που χρήζουν αναφοράς είναι τα εξής:

- Η μηδενική αγορά υβριδικών λεωφορείων και επομένως μηδενικό κόστος αγοράς τους, όπως και στο βασικό σενάριο.
- Η σημαντική αύξηση των πετρελαιοκίνητων που χρησιμοποιούνται και αγοράζονται κατά 139% και 280% αντίστοιχα καθώς και η μείωση κατά 38% του μέσου όρου ηλικίας τους που δικαιολογείται λόγω των αυξημένων αγορών.
- Η αύξηση των ηλεκτροκίνητων που χρησιμοποιούνται και αγοράζονται σε σύγκριση με την αντίστοιχη μείωση των λεωφορείων φυσικού αερίου που δείχνει ότι η αλλαγή του κόστους αγοράς των πετρελαιοκίνητων επηρεάζει άμεσα τη διαχείριση και των υπόλοιπων τύπων λεωφορείων.
- Η ελάχιστη μεταβολή του τελικού κόστους για τη διαχείριση του στόλου .

#### 5.4.3 Αποτελέσματα για υψηλό κόστος αγοράς πετρελαιοκίνητων λεωφορείων

Στο συγκεκριμένο σενάριο επιλέχθηκε ως υπόθεση το υψηλό κόστος αγοράς πετρελαιοκίνητων λεωφορείων με αύξηση 30% της αρχικής μέσης τιμής που είχε επιλεγεί στο βασικό σενάριο, από 236.841€ σε 307.894€. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι και οι περιορισμοί παραμένουν ίδιοι.

**Πίνακας 5.7:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου υψηλού κόστους αγοράς πετρελαιοκίνητων

|   | τελ. κόστος     | χρησιμοποιούνται |          |            |               | πωλούνται       |          |            |               | αγοράζονται     |          |            |               | ποσοστό των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               | μ.ο. ηλικίας λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               |
|---|-----------------|------------------|----------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|---------------|---|----------|------------|---------------|--|----------|------------|---------------|
|   |                 | πετρελαιοκίνητα  | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                             | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                              | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα |
| 1. ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ                       | € 1.006.657.050 | 276              | 275      | 1183       | 627           | 600             | 375      | 660        | 376           | 151             | 0        | 793        | 417           | 12%   | 12%      | 50%        | 27%           | 6,4  | 10,2     | 7,0        | 7,8           |
| 3. Υψηλό Κόστος Αγοράς Πετρελαιοκίνητων | € 992.165.137   | 100              | 300      | 1477       | 485           | 600             | 375      | 731        | 306           | 0               | 0        | 1087       | 275           | 4%  | 13%      | 63%        | 21%           | 10,3   | 9,8      | 6,8        | 7,9           |
| Μεταβολή από βασικό σενάριο             | -1,4%           | -63,8%           | 9,1%     | 24,9%      | -22,6%        | 0,0%            | 0,0%     | 10,8%      | -18,6%        | -100,0%         | x        | 37,1%      | -34,1%        | -64%  | 9%       | 25%        | -23%          | 62%  | -4%      | -3%        | 1%            |

**Πίνακας 5.8:** Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου

| ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ |                  |          |              |               |           |
|-------------------------|------------------|----------|--------------|---------------|-----------|
|                         | πετρελαιοκίνητα  | υβριδικά | φυσικό αέριο | ηλεκτροκίνητα | ΣΥΝΟΛΟ    |
| 1ος όρος                | 0                | 0        | 326640725    | 137168762     | 463809487 |
| 2ος όρος                | 69328418         | 30890953 | 74112799     | 14828120      | 189160291 |
| 3ος όρος                | 26959550         | 76342784 | 489767497    | 124446111     | 717515942 |
| <b>ΤΕΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ</b>    | <b>992165137</b> |          |              |               |           |



**Σχήμα 5.12:** Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος αγοράς πετρελαιοκίνητων



**Σχήμα 5.13:** Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος αγοράς πετρελαιοκίνητων

Από τους παραπάνω πίνακες και διαγράμματα είναι χρήσιμο να αναφερθούν τα εξής στοιχεία:

- Για τα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται:
  - α) Το 62% είναι φυσικού αερίου, το 21% είναι ηλεκτροκίνητα, ενώ το 13% και 4% είναι υβριδικά και πετρελαιοκίνητα αντίστοιχα.
  - β) Τα πετρελαιοκίνητα και τα υβριδικά έχουν μέσο όρο ηλικίας περίπου τα 10 έτη, ενώ τα ηλεκτροκίνητα και τα λεωφορεία φυσικού αερίου 8 και 7 έτη αντίστοιχα.
- Για τα λεωφορεία που πωλούνται:
  - α) Το 36% είναι φυσικού αερίου, το 30% είναι πετρελαιοκίνητα, το 19% υβριδικά και το 15% ηλεκτροκίνητα.
  - β) Τα περισσότερα πετρελαιοκίνητα (83%) πωλούνται το 1<sup>ο</sup> έτος έναρξης του πλάνου; όλα τα υβριδικά πωλούνται μέχρι και το 9<sup>ο</sup> έτος του πλάνου, όπως και στο σενάριο με χαμηλό κόστος αγοράς πετρελαιοκίνητων; όλα τα λεωφορεία φυσικού αερίου πωλούνται μέχρι το 10<sup>ο</sup> έτος του πλάνου; τα ηλεκτροκίνητα πωλούνται μέχρι και το 16<sup>ο</sup> έτος του πλάνου.
- Για τα λεωφορεία που αγοράζονται:
  - α) Μηδενικές αγορές πραγματοποιούνται στα πετρελαιοκίνητα και στα υβριδικά λεωφορεία; αγορές λεωφορείων φυσικού αερίου πραγματοποιούνται από το 3<sup>ο</sup> μέχρι και το 16<sup>ο</sup> έτος; ηλεκτρικά λεωφορεία αγοράζονται αποκλειστικά τα έτη 2,7,8.
  - β) Ποσοστιαία αγοράζονται κατά τη διάρκεια του πλάνου 80% λεωφορεία φυσικού αερίου, 20% ηλεκτροκίνητα και καθόλου πετρελαιοκίνητα και υβριδικά.

**Συγκριτικά** με το βασικό σενάριο τα στοιχεία που χρήζουν αναφοράς είναι τα εξής:

- Η μηδενική αγορά πετρελαιοκίνητων λεωφορείων και η ελάχιστη χρήση τους που είναι αποτέλεσμα της αύξησης του κόστους αγοράς τους.
- Η αύξηση κατά 63% του μέσου όρου ηλικίας των πετρελαιοκίνητων που δείχνει πως η ενδεχόμενη αύξηση της τιμής αγοράς του αυξάνει την ηλικία όσων χρησιμοποιούνται.
- Η αύξηση των λεωφορείων φυσικού αερίου που πωλούνται και αγοράζονται σε αντίθεση με την αντίστοιχη μείωση των ηλεκτροκίνητων.

#### 5.4.4 Αποτελέσματα για χαμηλό κόστος αγοράς υβριδικών λεωφορείων

Στο συγκεκριμένο σενάριο επιλέχθηκε ως υπόθεση το χαμηλό κόστος αγοράς υβριδικών λεωφορείων με μείωση 30% της αρχικής μέσης τιμής που είχε επιλεγθεί στο βασικό σενάριο, από 394.004€ σε 275.803€. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι και οι περιορισμοί παραμένουν ίδιοι.

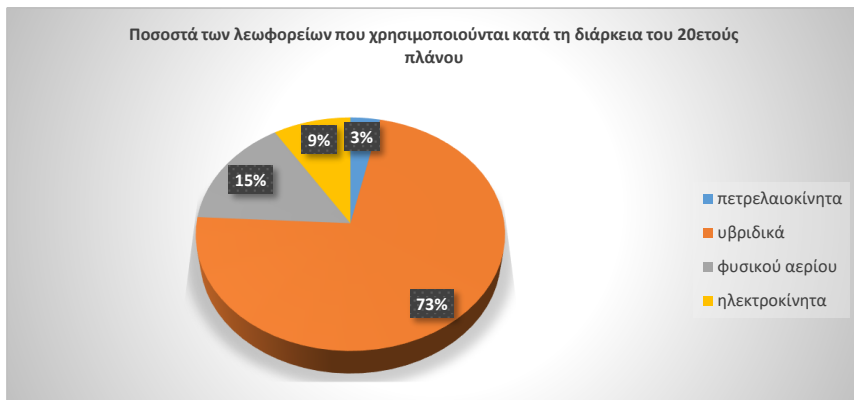
**Πίνακας 5.9:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου χαμηλού κόστους αγοράς υβριδικών

|                                   | τελ.κόστος      | χρησιμοποιούνται |          |            |               | πωλούνται       |          |            |               | αγοράζονται     |          |            |               | ποσοστό των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               | μ.ο. ηλικίας λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               |
|-----------------------------------|-----------------|------------------|----------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|---------------|---|----------|------------|---------------|--|----------|------------|---------------|
|                                   |                 | πετρελαιοκίνητα  | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                             | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                              | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα |
| 1. ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ                 | € 1.006.657.050 | 276              | 275      | 1183       | 627           | 600             | 375      | 660        | 376           | 151             | 0        | 793        | 417           | 12%   | 12%      | 50%        | 27%           | 6,4  | 10,2     | 7,0        | 7,8           |
| 4. Χαμηλό Κόστος Αγοράς Υβριδικών | € 969.529.060   | 80               | 1710     | 360        | 210           | 600             | 735      | 450        | 225           | 0               | 1360     | 0          | 0             | 3%  | 72%      | 15%        | 9%            | 10,0   | 6,9      | 9,3        | 9,7           |
| Μεταβολή από βασικό σενάριο       | -3,7%           | -71,0%           | 521,8%   | -69,6%     | -66,5%        | 0,0%            | 96,0%    | -31,8%     | -40,2%        | -100,0%         | 0-1360   | -100,0%    | -100,0%       | -71%  | 522%     | -70%       | -66%          | 57%  | -32%     | 33%        | 24%           |

**Πίνακας 5.10:** Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος αγοράς υβριδικών λεωφορείων

| ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ |                 |                  |              |               |          |           |
|-------------------------|-----------------|------------------|--------------|---------------|----------|-----------|
|                         | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά         | φυσικό αέριο | ηλεκτροκίνητα | ΣΥΝΟΛΟ   |           |
| 1ος όρος                |                 | 0                | 342781141    | 0             | 0        | 342781141 |
| 2ος όρος                |                 | 54409449         | 68645739     | 26552146      | 11242659 | 160849993 |
| 3ος όρος                |                 | 18016405         | 634828986    | 94452904      | 40299617 | 787597912 |
| <b>ΤΕΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ</b>    |                 | <b>969529060</b> |              |               |          |           |





**Σχήμα 5.14:** Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος αγοράς υβριδικών λεωφορείων



**Σχήμα 5.15:** Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος αγοράς υβριδικών

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι χρήσιμο να αναφερθούν τα εξής στοιχεία:

- Για τα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται:
  - α) Το 72% είναι υβριδικά, το 15% είναι φυσικού αερίου, ενώ το 9% και 3% είναι ηλεκτροκίνητα και πετρελαιοκίνητα αντίστοιχα.
  - β) Ο μικρότερος μέσος όρος ηλικίας από τα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται είναι των υβριδικών με 6,9 έτη.
- Για τα λεωφορεία που πωλούνται:
  - α) Το 37% είναι υβριδικά, το 30% είναι πετρελαιοκίνητα, το 22% φυσικού αερίου και το 11% ηλεκτροκίνητα.
  - β) Τα περισσότερα πετρελαιοκίνητα (87%) πωλούνται το 1<sup>ο</sup> έτος έναρξης του πλάνου; όλα τα υβριδικά πωλούνται μέχρι και το 9<sup>ο</sup> έτος του πλάνου, όπως και στα σενάρια με χαμηλό/υψηλό κόστος αγοράς πετρελαιοκίνητων; όλα τα λεωφορεία φυσικού αερίου πωλούνται μέχρι το 9<sup>ο</sup> έτος του πλάνου; τα ηλεκτροκίνητα πωλούνται μέχρι και το 15<sup>ο</sup> έτος του πλάνου.
- Για τα λεωφορεία που αγοράζονται:
  - α) Αγορές πραγματοποιούνται μόνο για τα υβριδικά λεωφορεία κατά τη διάρκεια των 20 ετών και ξεκινάει από το 2<sup>ο</sup> έτος μέχρι το 16<sup>ο</sup>.

**Συγκριτικά** με το βασικό σενάριο τα στοιχεία που χρήζουν αναφοράς είναι τα εξής:

- Αγοράζονται 1360 υβριδικά λεωφορεία, ενώ μηδενική ήταν η αγοράς τους στο βασικό σενάριο, γεγονός που υποδηλώνει την επιρροή της τιμής αγοράς των υβριδικών στις ενέργειες που εκτελούνται από το μοντέλο βελτιστοποίησης.
- Υπάρχει αύξηση της τάξης του 500% στη χρήση των υβριδικών λεωφορείων με παράλληλη μείωση περίπου 70% των υπόλοιπων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται, καθώς το 70% των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται είναι υβριδικά.
- Ο μέσος όρος ηλικίας των υβριδικών που χρησιμοποιούνται μειώνεται κατά 32%, ενώ των υπόλοιπων τύπων αυξάνεται από 24% έως 57%.
- Σημαντική είναι η μείωση του τελικού κόστους για τη διαχείριση του στόλου λεωφορείων που μειώνεται κατά 3,7%, γεγονός που δείχνει ότι η λειτουργία και τα χαρακτηριστικά των υβριδικών λεωφορείων είναι λιγότερο επιζήμια.

#### 5.4.5 Αποτελέσματα για υψηλό κόστος αγοράς υβριδικών λεωφορείων

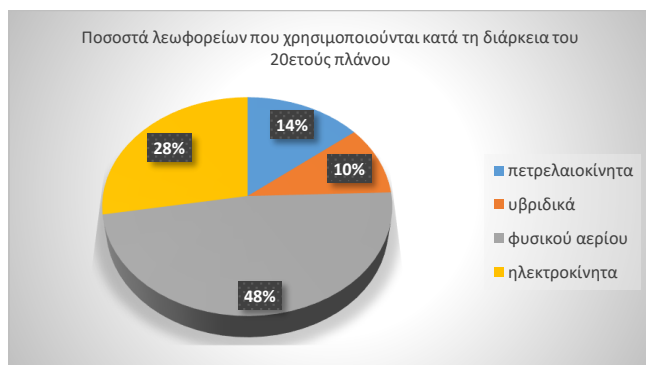
Στο συγκεκριμένο σενάριο επιλέχθηκε ως υπόθεση το υψηλό κόστος αγοράς υβριδικών λεωφορείων με αύξηση 30% της αρχικής μέσης τιμής που είχε επιλεχθεί στο βασικό σενάριο, από 394.004€ σε 512.205€. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι και οι περιορισμοί παραμένουν ίδιοι.

**Πίνακας 5.11:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου υψηλού κόστους αγοράς υβριδικών

|                                  | τελ. κόστος     | χρησιμοποιούνται |          |            |               | πωλούνται       |          |            |               | αγοράζονται     |          |            |               | ποσοστό των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               | μ.ο. ηλικίας λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               |
|----------------------------------|-----------------|------------------|----------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|---------------|---|----------|------------|---------------|--|----------|------------|---------------|
|                                  |                 | πετρελαιοκίνητα  | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                             | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                              | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα |
| 1. ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ                | € 1.006.657.050 | 276              | 275      | 1183       | 627           | 600             | 375      | 660        | 376           | 151             | 0        | 793        | 417           | 12%   | 12%      | 50%        | 27%           | 6,4  | 10,2     | 7,0        | 7,8           |
| 5. Υψηλό Κόστος Αγοράς Υβριδικών | € 995.032.079   | 335              | 240      | 1125       | 651           | 600             | 375      | 626        | 400           | 175             | 0        | 735        | 441           | 14%   | 10%      | 48%        | 28%           | 6,7  | 10,6     | 7,1        | 7,8           |
| Μεταβολή από βασικό σενάριο      | -1,2%           | 21,4%            | -12,7%   | -4,9%      | 3,8%          | 0,0%            | 0,0%     | -5,2%      | 6,4%          | 15,9%           | x        | -7,3%      | 5,8%          | 22%   | -12%     | -4%        | 4%            | 6%   | 4%       | 1%         | 0%            |

**Πίνακας 5.12:** Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος αγοράς υβριδικών λεωφορείων

| ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ |                  |          |              |               |           |
|-------------------------|------------------|----------|--------------|---------------|-----------|
|                         | πετρελαιοκίνητα  | υβριδικά | φυσικό αέριο | ηλεκτροκίνητα | ΣΥΝΟΛΟ    |
| 1ος όρος                | 32789124         |          | 0            | 221099158     | 221483115 |
| 2ος όρος                | 49708725         | 53351354 |              | 58264357      | 18904324  |
| 3ος όρος                | 90418224         | 57673007 |              | 373306254     | 178491955 |
| <b>ΤΕΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ</b>    | <b>995032079</b> |          |              |               |           |



**Σχήμα 5.16:** Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος αγοράς υβριδικών λεωφορείων



**Σχήμα 5.17:** Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος αγοράς υβριδικών

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι χρήσιμο να αναφερθούν τα εξής στοιχεία:

- Για τα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται:
  - α) Το 48% είναι φυσικού αερίου, το 28% είναι ηλεκτροκίνητα, ενώ το 14% και 10% είναι πετρελαιοκίνητα και υβριδικά αντίστοιχα.
- Για τα λεωφορεία που πωλούνται:
  - α) Το 31% είναι φυσικού αερίου, το 30% είναι πετρελαιοκίνητα, το 19% υβριδικά και το 20% ηλεκτροκίνητα.
  - β) Τα περισσότερα πετρελαιοκίνητα (73%) πωλούνται το 1<sup>ο</sup> έτος έναρξης του πλάνου; όλα τα υβριδικά πωλούνται μέχρι και το 9<sup>ο</sup> έτος του πλάνου; όλα τα λεωφορεία φυσικού αερίου πωλούνται μέχρι το 10<sup>ο</sup> έτος του πλάνου; τα ηλεκτροκίνητα πωλούνται μέχρι και το 18<sup>ο</sup> έτος του πλάνου.
- Για τα λεωφορεία που αγοράζονται:
  - α) Μηδενικές αγορές πραγματοποιούνται στα υβριδικά λεωφορεία, που εξηγείται λόγω της αύξησης του κόστους αγοράς; αγορές πετρελαιοκίνητων πραγματοποιούνται αποκλειστικά τα έτη 16,17,18; αγορές λεωφορείων φυσικού

αερίου πραγματοποιούνται από το 4<sup>ο</sup> μέχρι και το 15<sup>ο</sup> έτος; ηλεκτρικά λεωφορεία αγοράζονται αποκλειστικά τα έτη 2,3,4,7,8.

β) Ποσοστιαία αγοράζονται κατά τη διάρκεια του πλάνου 54% λεωφορεία φυσικού αερίου, 33% ηλεκτροκίνητα και 13% πετρελαιοκίνητα.

**Συγκριτικά** με το βασικό σενάριο τα στοιχεία που χρήζουν αναφοράς είναι τα εξής:

- Μικρές μεταβολές σε όλες τις τιμές που αναλύθηκαν, που εξηγείται καθώς η αύξηση του κόστους αγοράς των υβριδικών λεωφορείων οδήγησε σε μη αγορά τους, κατάσταση που ίσχυε και στο βασικό μοντέλο. Οι μεταβολές που παρατηρούνται προκύπτουν λογικά από την επιρροή των μεταβλητών στη στιγμή που παίρνεται η κάθε απόφαση για την εκάστοτε ενέργεια του μοντέλου.

#### 5.4.6 Αποτελέσματα για χαμηλό κόστος αγοράς λεωφορείων φυσικού αερίου

Στο συγκεκριμένο σενάριο επιλέχθηκε ως υπόθεση το χαμηλό κόστος αγοράς λεωφορείων φυσικού αερίου με μείωση 30% της αρχικής μέσης τιμής που είχε επιλεγεί στο βασικό σενάριο, από 333.954€ σε 233.768€. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι και οι περιορισμοί παραμένουν ίδιοι.

**Πίνακας 5.13:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου χαμηλού κόστους αγοράς λεωφορείων φυσικού αερίου

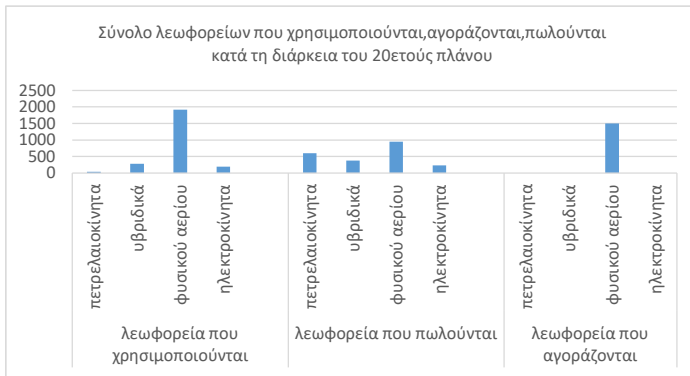
|   | τελ. κόστος     | χρησιμοποιούνται |          |            |               | πωλούνται       |          |            |               | αγοράζονται     |          |            |               | ποσοστό των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               | μ.ο. ηλικίας λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               |
|---|-----------------|------------------|----------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|---------------|---|----------|------------|---------------|--|----------|------------|---------------|
|   |                 | πετρελαιοκίνητα  | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                             | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                              | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα |
| 1. ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ                                 | € 1.006.657.050 | 276              | 275      | 1183       | 627           | 600             | 375      | 660        | 376           | 151             | 0        | 793        | 417           | 12%   | 12%      | 50%        | 27%           | 6,4  | 10,2     | 7,0        | 7,8           |
| 6. Χαμηλό Κόστος Αγοράς Λεωφορείων Φυσικού Αερίου | € 901.977.478   | 40               | 275      | 1920       | 195           | 600             | 375      | 950        | 225           | 0               | 0        | 1500       | 0             | 2%  | 11%      | 79%        | 8%            | 1,0  | 10,5     | 6,9        | 10,2          |
| Μεταβολή από βασικό σενάριο                       | -10,4%          | -85,5%           | 0,0%     | 62,3%      | -68,9%        | 0,0%            | 0,0%     | 43,9%      | -40,2%        | -100,0%         | x        | 89,2%      | -100,0%       | -86%  | -3%      | 58%        | -70%          | -84%   | 3%       | -2%        | 31%           |

**Πίνακας 5.14:** Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος αγοράς λεωφορείων φυσικού αερίου

| ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ |                  |          |              |               |           |
|-------------------------|------------------|----------|--------------|---------------|-----------|
|                         | πετρελαιοκίνητα  | υβριδικά | φυσικό αέριο | ηλεκτροκίνητα | ΣΥΝΟΛΟ    |
| 1ος όρος                | 0                | 0        | 324123192    | 0             | 324123192 |
| 2ος όρος                | 56100527         | 41299599 | 72683819     | 23514966      | 193598911 |
| 3ος όρος                | 2527927          | 56605780 | 681645862    | 30673628      | 771453197 |
| <b>ΤΕΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ</b>    | <b>901977478</b> |          |              |               |           |



**Σχήμα 5.18:** Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος αγοράς λεωφορείων φυσικού αερίου



**Σχήμα 5.19:** Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος αγοράς λεωφορείων φυσικού αερίου

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι χρήσιμο να αναφερθούν τα εξής στοιχεία:

- Για τα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται:
  - α) Το 79% είναι φυσικού αερίου, 11% υβριδικά, 8% ηλεκτροκίνητα, ενώ οριακά μηδενική συμμετοχή έχουν τα πετρελαιοκίνητα.
  - β) Ο μέσος όρος ηλικίας των πετρελαιοκίνητων που είναι 1 έτος δε λαμβάνεται υπόψη λόγω της ελάχιστης χρήσης τους.
- Για τα λεωφορεία που πωλούνται:
  - α) Το 44% είναι φυσικού αερίου, το 28% είναι πετρελαιοκίνητα, το 17% υβριδικά και το 11% ηλεκτροκίνητα.
  - β) Τα περισσότερα πετρελαιοκίνητα (93%) πωλούνται το 1<sup>ο</sup> έτος έναρξης του πλάνου; όλα τα υβριδικά πωλούνται μέχρι και το 8<sup>ο</sup> έτος του πλάνου; όλα τα λεωφορεία φυσικού αερίου πωλούνται μέχρι το 9<sup>ο</sup> έτος του πλάνου; τα ηλεκτροκίνητα πωλούνται μέχρι και το 13<sup>ο</sup> έτος του πλάνου.
- Για τα λεωφορεία που αγοράζονται:
  - α) Μηδενικές αγορές πραγματοποιούνται στα πετρελαιοκίνητα, στα υβριδικά και στα ηλεκτροκίνητα λεωφορεία, με αποτέλεσμα το 100% των αγορών να

πραγματοποιούνται για λεωφορεία φυσικού αερίου από την έναρξη του πλάνου έως και το 13<sup>ο</sup> έτος.

**Συγκριτικά** με το βασικό σενάριο τα στοιχεία που χρήζουν αναφοράς είναι τα εξής:

- Η μηδενική αγορά ηλεκτροκίνητων και πετρελαιοκίνητων λεωφορείων που δικαιολογείται με την αγορά μόνο λεωφορείων φυσικού αερίου τα οποία είναι φθηνότερα κατά 30%.
- Η ραγδαία αύξηση των λεωφορείων φυσικού αερίου που χρησιμοποιούνται κατά 62,3% σε συνδυασμό με τη μείωση των πετρελαιοκίνητων και ηλεκτροκίνητων δικαιολογείται από την αύξηση αγορών του συγκεκριμένου τύπου.
- Η μικρή μείωση του μέσου όρου ηλικίας του λεωφορείων φυσικού αερίου η οποία παραμένει στα 7 έτη.
- Σημαντική μείωση κατά 10,4% του τελικού κόστους που προκύπτει για τη διαχείριση του στόλου λεωφορείων κατά τη διάρκεια των 20 ετών, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο συνδυασμός αγοράς, χρήσης αλλά και πώλησης φθηνότερων λεωφορείων φυσικού αερίου είναι αρκετά οικονομικός.



#### 5.4.7 Αποτελέσματα για υψηλό κόστος αγοράς λεωφορείων φυσικού αερίου

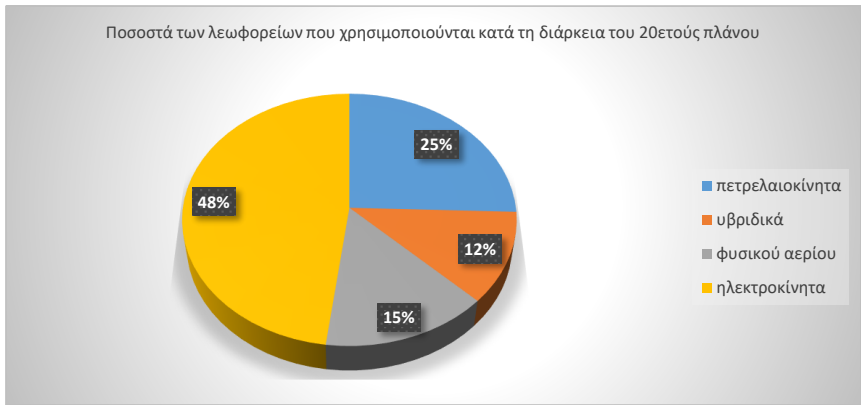
Στο συγκεκριμένο σενάριο επιλέχθηκε ως υπόθεση το υψηλό κόστος αγοράς λεωφορείων φυσικού αερίου με αύξηση 30% της αρχικής μέσης τιμής που είχε επιλεγεί στο βασικό σενάριο, από 333.954€ σε 434.140€. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι και οι περιορισμοί παραμένουν ίδιοι.

**Πίνακας 5.15:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου υψηλού κόστους αγοράς λεωφορείων φυσικού αερίου

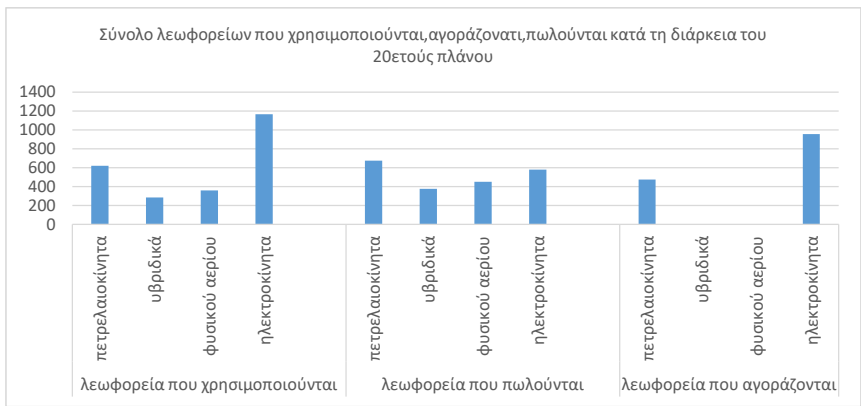
|  | τελ. κόστος     | χρησιμοποιούνται |          |            |               | πωλούνται       |          |            |               | αγοράζονται     |          |            |               | ποσοστό των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               | μ.ο. ηλικίας λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               |
|--|-----------------|------------------|----------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|---------------|---|----------|------------|---------------|--|----------|------------|---------------|
|  |                 | πετρελαιοκίνητα  | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                             | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                              | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα |
| 1. ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ                            | € 1.006.657.050 | 276              | 275      | 1183       | 627           | 600             | 375      | 660        | 376           | 151             | 0        | 793        | 417           | 12%   | 12%      | 50%        | 27%           | 6,4  | 10,2     | 7,0        | 7,8           |
| 7. Υψηλό Κόστος Αγοράς Λεωφορείων Φυσ.Αερίου | € 1.002.544.152 | 620              | 285      | 360        | 1165          | 675             | 375      | 450        | 580           | 475             | 0        | 0          | 955           | 26%   | 12%      | 15%        | 48%           | 5,0  | 10,2     | 10,2       | 7,4           |
| Μεταβολή από βασικό σενάριο                  | -0,4%           | 124,6%           | 3,6%     | -69,6%     | 85,8%         | 12,5%           | 0,0%     | -31,8%     | 54,3%         | 214,6%          | x        | -100,0%    | 129,0%        | 118%  | 1%       | -70%       | 81%           | -21%   | 0%       | 46%        | -5%           |

**Πίνακας 5.16:** Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος αγοράς λεωφορείων φυσικού αερίου

| ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ |                   |          |              |               |           |
|-------------------------|-------------------|----------|--------------|---------------|-----------|
|                         | πετρελαιοκίνητα   | υβριδικά | φυσικό αέριο | ηλεκτροκίνητα | ΣΥΝΟΛΟ    |
| 1ος όρος                | 91415801          | 0        | 0            | 475698627     | 567114428 |
| 2ος όρος                | 64331825          | 36435964 | 48098679     | 27133337      | 175999805 |
| 3ος όρος                | 135096170         | 67106410 | 79065918     | 330161030     | 611429529 |
| <b>ΤΕΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ</b>    | <b>1002544152</b> |          |              |               |           |



**Σχήμα 5.20:** Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος αγοράς λεωφορείων φυσικού αερίου



**Σχήμα 5.21:** Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος αγοράς λεωφορείων φυσικού αερίου

Από τα παραπάνω διαγράμματα και πίνακες είναι χρήσιμο να αναφερθούν τα εξής στοιχεία:

- Για τα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται:
  - α) Το 48% είναι ηλεκτροκίνητα, το 26% είναι πετρελαιοκίνητα, ενώ 15% και 12% είναι λεωφορεία φυσικού αερίου και υβριδικά αντίστοιχα.
  - β) Τα πετρελαιοκίνητα χρησιμοποιούνται όλα τα έτη με εξαίρεση από το 7<sup>ο</sup> έως το 12<sup>ο</sup> με μέσο όρο ηλικίας τα 5 έτη; τα υβριδικά χρησιμοποιούνται μόνο τα 8 πρώτα χρόνια με μέσο όρο ηλικίας τα 10 έτη, όπως και τα λεωφορεία φυσικού αερίου; τα ηλεκτροκίνητα χρησιμοποιούνται κάθε έτος με μέσο όρο ηλικίας τα 7,4 έτη.
- Για τα λεωφορεία που πωλούνται:
  - α) Το 22% είναι φυσικού αερίου, το 32% είναι πετρελαιοκίνητα, το 18% υβριδικά και το 28% ηλεκτροκίνητα.
  - β) Τα περισσότερα πετρελαιοκίνητα (67%) πωλούνται το 1<sup>ο</sup> έτος έναρξης του πλάνου; όλα τα υβριδικά πωλούνται μέχρι και το 9<sup>ο</sup> έτος του πλάνου, όπως και τα λεωφορεία φυσικού αερίου; τα ηλεκτροκίνητα πωλούνται καθ' όλη τη διάρκεια του πλάνου με εξαίρεση τα έτη 11,12,20.
- Για τα λεωφορεία που αγοράζονται:
  - α) Το 67% των λεωφορείων που αγοράζονται είναι ηλεκτροκίνητα και το υπόλοιπο 33% πετρελαιοκίνητα.
  - β) Οι αγορές των ηλεκτροκίνητων πραγματοποιούνται από το 2<sup>ο</sup> μέχρι το 10<sup>ο</sup> έτος, ενώ των πετρελαιοκίνητων πραγματοποιούνται κυρίως από το 13<sup>ο</sup> έως το 19<sup>ο</sup> έτος

**Συγκριτικά** με το βασικό σενάριο τα στοιχεία που χρήζουν αναφοράς είναι τα εξής:

- Η μηδενική αγορά λεωφορείων φυσικού αερίου, όπως ήταν αναμενόμενο λόγω της αύξησης της τιμής αγοράς τους, η οποία συνδέεται άμεσα και με τη μείωση κατά 60% των λεωφορείων αυτού του τύπου που χρησιμοποιούνται.
- Η σημαντική αύξηση των πετρελαιοκίνητων και των ηλεκτροκίνητων που χρησιμοποιούνται και αγοράζονται, με μεγαλύτερη ευαισθησία αυτή των πετρελαιοκίνητων (125% χρησιμοποιούνται παραπάνω και 215% αγοράζονται παραπάνω σε σχέση με το βασικό σενάριο).
- Η μικρές μεταβολές στις τιμές που αφορούν τα υβριδικά λεωφορεία, τα οποία επηρεάζονται κυρίως μόνο για μεταβολές των παραμέτρων που συνδέονται άμεσα μεταξύ τους.

#### 5.4.8 Αποτελέσματα για χαμηλό κόστος αγοράς ηλεκτροκίνητων λεωφορείων

Στο συγκεκριμένο σενάριο επιλέχθηκε ως υπόθεση το χαμηλό κόστος αγοράς ηλεκτροκίνητων λεωφορείων με μείωση 30% της αρχικής μέσης τιμής που είχε επιλεγεί στο βασικό σενάριο, από 538.500€ σε 376.950€. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι και οι περιορισμοί παραμένουν ίδιοι.

**Πίνακας 5.17:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου χαμηλού κόστους αγοράς ηλεκτροκίνητων

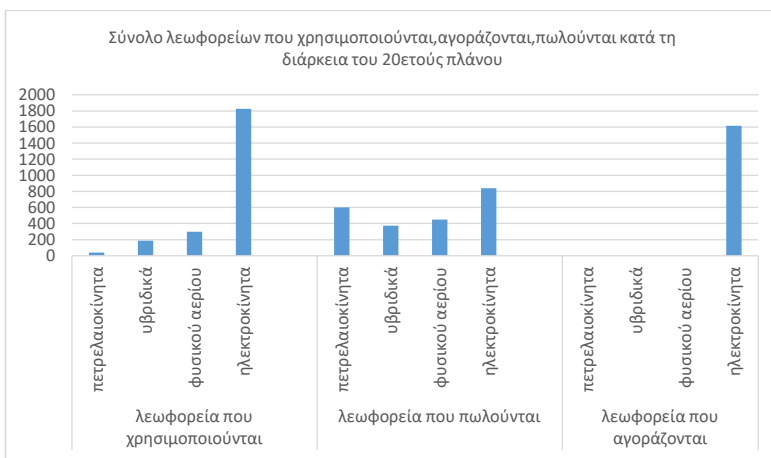
|  | τελ.κόστος      | χρησιμοποιούνται |          |            |               | πωλούνται       |          |            |               | αγοράζονται     |          |            |               | ποσοστό των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               | μ.ο. ηλικίας λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               |
|--|-----------------|------------------|----------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|---------------|---|----------|------------|---------------|--|----------|------------|---------------|
|  |                 | πετρελαιοκίνητα  | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                             | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                              | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα |
| 1. ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ                      | € 1.006.657.050 | 276              | 275      | 1183       | 627           | 600             | 375      | 660        | 376           | 151             | 0        | 793        | 417           | 12%   | 12%      | 50%        | 27%           | 6,4  | 10,2     | 7,0        | 7,8           |
| 8. Χαμηλό Κόστος Αγοράς Ηλεκτροκίνητων | € 836.810.091   | 40               | 185      | 300        | 1825          | 600             | 375      | 450        | 840           | 0               | 0        | 0          | 1615          | 2%  | 8%       | 13%        | 78%           | 1,0  | 10,6     | 10,4       | 6,5           |
| Μεταβολή από βασικό σενάριο            | -16,9%          | -85,5%           | -32,7%   | -74,6%     | 191,1%        | 0,0%            | 0,0%     | -31,8%     | 123,4%        | -100,0%         | x        | -100,0%    | 287,3%        | -85%  | -32%     | -75%       | 192%          | -84%   | 4%       | 49%        | -17%          |

**Πίνακας 5.18:** Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος αγοράς ηλεκτροκίνητων λεωφορείων

| ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ |                 |                  |              |               |           |
|-------------------------|-----------------|------------------|--------------|---------------|-----------|
|                         | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά         | φυσικό αέριο | ηλεκτροκίνητα | ΣΥΝΟΛΟ    |
| 1ος όρος                |                 | 0                | 0            | 0             | 564008932 |
| 2ος όρος                |                 | 56100527         | 45976473     | 42203110      | 100526325 |
| 3ος όρος                |                 | 2527927          | 43179110     | 64846613      | 407053943 |
| <b>ΤΕΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ</b>    |                 | <b>836810091</b> |              |               |           |



**Σχήμα 5.22:** Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος αγοράς ηλεκτροκίνητων



**Σχήμα 5.23:** Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος αγοράς ηλεκτροκίνητων

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι χρήσιμο να αναφερθούν τα εξής στοιχεία:

- Για τα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται:
  - α) Το 78% είναι ηλεκτροκίνητα, το 13% είναι φυσικού αερίου, το 8% είναι υβριδικά, ενώ τα 40 πετρελαιοκίνητα που χρησιμοποιούνται μόνο το 1<sup>ο</sup> με ποσοστό επί του συνόλου 2%.
  - β) Τα υβριδικά χρησιμοποιούνται μόνο τα 7 πρώτα χρόνια, όπως και τα λεωφορεία φυσικού αερίου με μέσο όρο ηλικίας τα 10,5 έτη; τα ηλεκτροκίνητα χρησιμοποιούνται κάθε έτος με μέσο όρο ηλικίας τα 6,5 έτη.
- Για τα λεωφορεία που πωλούνται:
  - α) Το 20% είναι φυσικού αερίου, το 26% είναι πετρελαιοκίνητα, το 17% υβριδικά και το 37% ηλεκτροκίνητα.
  - β) Όλα τα πετρελαιοκίνητα πωλούνται μέχρι το 2<sup>ο</sup> έτος από την έναρξη του πλάνου; όλα τα υβριδικά πωλούνται μέχρι και το 8<sup>ο</sup> έτος του πλάνου, όπως και τα λεωφορεία φυσικού αερίου; τα ηλεκτροκίνητα πωλούνται μέχρι το 10<sup>ο</sup> έτος.
- Για τα λεωφορεία που αγοράζονται:
  - α) Ο μοναδικός τύπος λεωφορείων που αγοράζεται είναι τα ηλεκτροκίνητα.
  - β) Οι αγορές των ηλεκτροκίνητων πραγματοποιούνται από το 1<sup>ο</sup> μέχρι και το 10<sup>ο</sup> έτος.

**Συγκριτικά** με το βασικό σενάριο τα στοιχεία που χρήζουν αναφοράς είναι τα εξής:

- Η ραγδαία αύξηση της τάξης του 200% των ηλεκτροκίνητων που χρησιμοποιούνται και 300% των ηλεκτροκίνητων που αγοράζονται, δείχνοντας τις σημαντικές αλλαγές που μπορεί να επιφέρει η ενδεχόμενη μείωση του κόστους αγοράς τους.
- Η σημαντική μείωση του μέσου όρους ηλικίας όσων ηλεκτροκίνητων χρησιμοποιούνται κατά 17%.
- Η μείωση κατά 17% του τελικού κόστους διαχείρισης του στόλου λεωφορείων, η οποία δικαιολογείται από την αγορά μόνο ηλεκτροκίνητων με μειωμένο κατά 30% κόστος αγοράς, τη πώληση όλων των υπόλοιπων τύπων λεωφορείων και την οικονομικότερη λειτουργία και συντήρηση που έχουν τα ηλεκτροκίνητα.

#### 5.4.9 Αποτελέσματα για υψηλό κόστος αγοράς ηλεκτροκίνητων λεωφορείων

Στο συγκεκριμένο σενάριο επιλέχθηκε ως υπόθεση το υψηλό κόστος αγοράς ηλεκτροκίνητων λεωφορείων με αύξηση 30% της αρχικής μέσης τιμής που είχε επιλεγθεί στο βασικό σενάριο, από 538.500€ σε 700.050€. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι και οι περιορισμοί παραμένουν ίδιοι.

**Πίνακας 5.9:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου υψηλού κόστους αγοράς ηλεκτροκίνητων

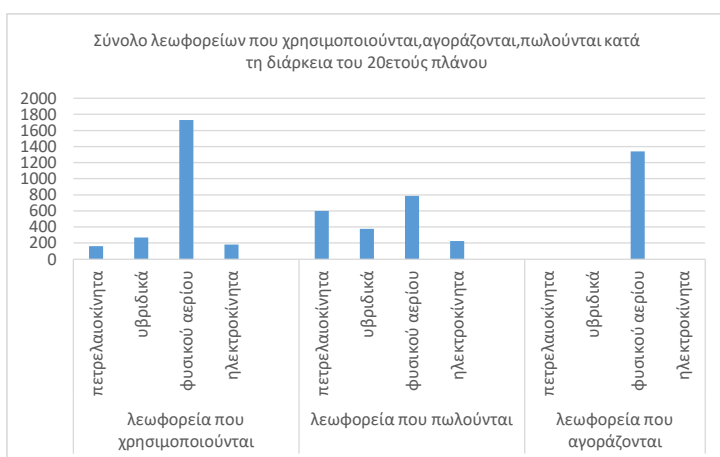
|                                       | τελ. κόστος     | χρησιμοποιούνται       |              |                |                       | πωλούνται                   |              |                |                       | αγοράζονται            |              |                |                       | ποσοστό των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |                    |                           |                             | μ.ο. ηλικίας λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |                    |                           |      |
|---------------------------------------|-----------------|------------------------|--------------|----------------|-----------------------|-----------------------------|--------------|----------------|-----------------------|------------------------|--------------|----------------|-----------------------|---|--------------------|---------------------------|-----------------------------|--|--------------------|---------------------------|------|
|                                       |                 | πετρελ<br>αικίν<br>ητα | υβρι<br>δικά | φυσ.α<br>ερίου | ηλεκτ<br>ροκίνητ<br>α | πετρ<br>ελαι<br>οκίνητ<br>α | υβρι<br>δικά | φυσ.αε<br>ρίου | ηλεκτρ<br>οκίνητ<br>α | πετρελα<br>οκίνητ<br>α | υβρι<br>δικά | φυσ.αε<br>ρίου | ηλεκτρο<br>κίνητ<br>α | πετρ<br>ελαι<br>οκίνητ<br>α                 | φυσ.<br>αερί<br>ου | ηλεκτ<br>ροκίν<br>ητ<br>α | πετρ<br>ελαίο<br>κίνητ<br>α | υβρι<br>δικά                                 | φυσ.<br>αερί<br>ου | ηλεκ<br>τροκί<br>νητ<br>α |      |
| 1. ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ                     | € 1.006.657.050 | 276                    | 275          | 1183           | 627                   | 600                         | 375          | 660            | 376                   | 151                    | 0            | 793            | 417                   | 12%   | 12%                | 50%                       | 27%                         | 6,4  | 10,2               | 7,0                       | 7,8  |
| 9. Υψηλό Κόστος Αγοράς Ηλεκτροκίνητων | € 1.002.526.047 | 160                    | 270          | 1728           | 180                   | 600                         | 375          | 788            | 225                   | 0                      | 0            | 1338           | 0                     | 7%  | 12%                | 74%                       | 8%                          | 10,3   | 9,8                | 6,9                       | 10,2 |
| Μεταβολή από βασικό σενάριο           | -0,4%           | -42,0%                 | -2%          | 46,1%          | -71,3%                | 0,0%                        | 0,0%         | 19,4%          | -40,2%                | -100,0%                | x            | 68,7%          | -100,0%               | -41%  | -1%                | 48%                       | -71%                        | 62%  | -4%                | -1%                       | 30%  |

**Πίνακας 5.10:** Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος αγοράς ηλεκτροκίνητων λεωφορείων

| ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ |                   |          |              |               |           |
|-------------------------|-------------------|----------|--------------|---------------|-----------|
|                         | πετρελαιοκίνητα   | υβριδικά | φυσικό αέριο | ηλεκτροκίνητα | ΣΥΝΟΛΟ    |
| 1ος όρος                | 0                 | 0        | 407589096    | 0             | 407589096 |
| 2ος όρος                | 49708725          | 32985704 | 80328113     | 30775844      | 193798386 |
| 3ος όρος                | 53688466          | 71451172 | 633334782    | 30260917      | 788735337 |
| <b>ΤΕΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ</b>    | <b>1002526047</b> |          |              |               |           |



**Σχήμα 5.24:** Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος αγοράς ηλεκτροκίνητων



**Σχήμα 5.25:** Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος αγοράς ηλεκτροκίνητων



Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι χρήσιμο να αναφερθούν τα εξής στοιχεία:

- Για τα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται:
  - α) Το 74% είναι φυσικού αερίου, το 12% είναι υβριδικά, το 8% είναι ηλεκτροκίνητα και το υπόλοιπο 7% είναι πετρελαιοκίνητα.
  - β) Τα πετρελαιοκίνητα χρησιμοποιούνται μόνο τα 7 πρώτα χρόνια, όπως και τα υβριδικά με μέσο όρο ηλικίας τα 10 έτη; τα ηλεκτροκίνητα χρησιμοποιούνται μέχρι το 12<sup>ο</sup> έτος με μέσο όρο ηλικίας τα 10 έτη, ενώ του φυσικού αερίου χρησιμοποιούνται καθ' όλη τη διάρκεια με μέσο όρο ηλικίας τα 7 έτη.
- Για τα λεωφορεία που πωλούνται:
  - α) Το 20% είναι φυσικού αερίου, το 26% είναι πετρελαιοκίνητα, το 17% υβριδικά και το 37% ηλεκτροκίνητα.
  - β) Το 80% από τα πετρελαιοκίνητα πωλούνται μέχρι το 2<sup>ο</sup> έτος από την έναρξη του πλάνου; όλα τα υβριδικά πωλούνται μέχρι και το 9<sup>ο</sup> έτος του πλάνου, όπως και τα λεωφορεία φυσικού αερίου μέχρι και το 10<sup>ο</sup>; τα ηλεκτροκίνητα πωλούνται μέχρι το 13<sup>ο</sup> έτος.
- Για τα λεωφορεία που αγοράζονται:
  - α) Ο μοναδικός τύπος λεωφορείων που αγοράζεται είναι τα λεωφορεία φυσικού αερίου.
  - β) Οι αγορές λεωφορείων φυσικού αερίου πραγματοποιούνται από το μέχρι και το 13<sup>ο</sup> έτος.

**Συγκριτικά** με το βασικό σενάριο τα στοιχεία που χρήζουν αναφοράς είναι τα εξής:

- Από την αύξηση στο κόστος αγοράς των ηλεκτροκίνητων επηρεάζονται οι αγορές τόσο των ιδίων όσο και των πετρελαιοκίνητων που μηδενίζονται και πραγματοποιούνται μόνο φυσικού αερίου με αύξηση 70% από αυτές του βασικού σεναρίου.
- Παράλληλα αυξάνεται ο μέσος όρος ηλικίας των πετρελαιοκίνητων κατά 60% και των ηλεκτροκίνητων 30% καθώς δεν γίνεται ανανέωση των συγκεκριμένων τύπων με αγορά νέων και αυξάνεται η ηλικία τους με το πέρασμα των ετών πριν τη πώληση τους.

#### 5.4.10 Αποτελέσματα για χαμηλό κόστος πετρελαίου

Στο συγκεκριμένο σενάριο επιλέχθηκε ως υπόθεση το χαμηλό κόστος του πετρελαίου με μείωση 30% της αρχικής μέσης τιμής που είχε επιλεγεί στο βασικό σενάριο, από 1,30 €/λίτρο σε 0,91€/λίτρο. Το κόστος του πετρελαίου λειτουργεί ως παράμετρος τόσο στα πετρελαιοκίνητα, όσο και στα υβριδικά λεωφορεία, τα οποία λειτουργούν με συνδυασμό ηλεκτρικής ενέργειας και πετρελαίου. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι και οι περιορισμοί παραμένουν ίδιοι.

**Πίνακας 5.11:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου χαμηλού κόστους πετρελαίου

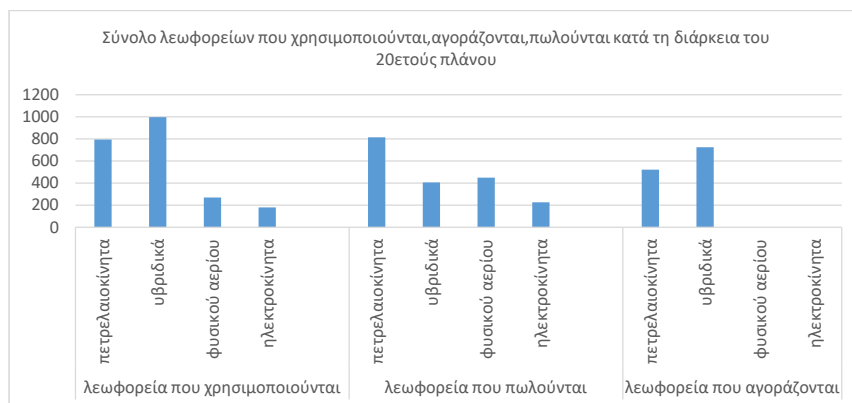
|                              | τελ. κόστος     | χρησιμοποιούνται |          |            |               | πωλούνται       |          |            |               | αγοράζονται     |          |            |               | ποσοστό των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               | μ.ο. ηλικίας λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               |
|------------------------------|-----------------|------------------|----------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|---------------|---|----------|------------|---------------|--|----------|------------|---------------|
|                              |                 | πετρελαιοκίνητα  | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                             | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                              | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα |
| 1. ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ            | € 1.006.657.050 | 276              | 275      | 1183       | 627           | 600             | 375      | 660        | 376           | 151             | 0        | 793        | 417           | 12%   | 12%      | 50%        | 27%           | 6,4  | 10,2     | 7,0        | 7,8           |
| 10. Χαμηλό Κόστος Πετρελαίου | € 936.869.655   | 796              | 999      | 270        | 180           | 815             | 405      | 450        | 225           | 521             | 724      | 0          | 0             | 35%   | 44%      | 12%        | 8%            | 6,4  | 7,6      | 10,2       | 9,5           |
| Μεταβολή από βασικό σενάριο  | -7%             | 188%             | 263%     | -77%       | -71%          | 36%             | 8%       | -32%       | -40%          | 245%            | 0-724    | -100%      | -100%         | 203%  | 282%     | -76%       | -70%          | 0%   | -25%     | 45%        | 22%           |

**Πίνακας 5.12:** Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος πετρελαίου

| ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ |                  |           |              |               |           |
|-------------------------|------------------|-----------|--------------|---------------|-----------|
|                         | πετρελαιοκίνητα  | υβριδικά  | φυσικό αέριο | ηλεκτροκίνητα | ΣΥΝΟΛΟ    |
| 1ος όρος                | 108851905        | 258381865 | 0            | 0             | 367233770 |
| 2ος όρος                | 70418096         | 22831987  | 37032484     | 11744609      | 142027176 |
| 3ος όρος                | 223286492        | 371155178 | 78153009     | 39068381      | 711663061 |
| <b>ΤΕΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ</b>    | <b>936869655</b> |           |              |               |           |



**Σχήμα 5.26:** Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος πετρελαίου



**Σχήμα 5.27:** Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος πετρελαίου

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι χρήσιμο να αναφερθούν τα εξής στοιχεία:

- Για τα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται:
  - α) Το 44% είναι υβριδικά, το 35% είναι πετρελαιοκίνητα, ενώ το 12% και 8% είναι φυσικού αερίου και ηλεκτροκίνητα αντίστοιχα.
  - β) Τα πετρελαιοκίνητα χρησιμοποιούνται καθ' όλη τη διάρκεια του πλάνου, όπως και τα υβριδικά με μέσο όρο ηλικίας τα 6,4 και 7,6 έτη αντίστοιχα; τα λεωφορεία φυσικού αερίου χρησιμοποιούνται μόνο τα 11 πρώτα χρόνια και τα ηλεκτροκίνητα χρησιμοποιούνται τα πρώτα 14 έτη του πλάνου με μέσο όρο ηλικίας τα 10 έτη.
- Για τα λεωφορεία που πωλούνται:
  - α) Το 43% είναι πετρελαιοκίνητα, το 24% είναι φυσικού αερίου, το 21% υβριδικά και το 12% ηλεκτροκίνητα.
  - β) Όλα τα πετρελαιοκίνητα έχουν πωληθεί μέχρι το 9<sup>ο</sup> έτος του πλάνου; το ίδιο συμβαίνει και με τα υβριδικά μέχρι το 16<sup>ο</sup> έτος, τα λεωφορεία φυσικού αερίου μέχρι το 12<sup>ο</sup> έτος του πλάνου και τα ηλεκτροκίνητα μέχρι και το 15<sup>ο</sup> έτος του πλάνου.
- Για τα λεωφορεία που αγοράζονται:
  - α) Ποσοστιαία αγοράζονται κατά τη διάρκεια του πλάνου 58% υβριδικά, 42% πετρελαιοκίνητα και μηδενικές αγορές πραγματοποιούνται για υβριδικά και φυσικού αερίου.
  - β) Αγορές πετρελαιοκίνητων πραγματοποιούνται από το 4<sup>ο</sup> μέχρι και το 16<sup>ο</sup> έτος; υβριδικά λεωφορεία αγοράζονται αποκλειστικά τα έτη 2,7,8,9.

**Συγκριτικά** με το βασικό σενάριο τα στοιχεία που χρήζουν αναφοράς είναι τα εξής:

- Η σημαντική αύξηση κατά 188% και 263% των πετρελαιοκίνητων και των υβριδικών αντίστοιχα που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια των 20 ετών του πλάνου.
- Αγοράζονται 245% περισσότερα πετρελαιοκίνητα και 724 έναντι 0 υβριδικά. Αυτή η αύξηση των αγορών αυτών των τύπων έχει ως αντίκτυπο τη μηδενική αγορά των υπόλοιπων δύο τύπων.
- Εντύπωση προκαλεί η μείωση του μέσου όρου ηλικίας κατά 25% μόνο των υβριδικών και μηδενική μείωση του μέσου όρου ηλικίας των πετρελαιοκίνητων, το οποίο συνέβη λόγω των αυξημένων πωλήσεων που πραγματοποιούνται στα πετρελαιοκίνητα τα πρώτα έτη του πλάνου.
- Σημαντική είναι και η μείωση κατά 7% του τελικού κόστους.

#### 5.4.11 Αποτελέσματα για υψηλό κόστος πετρελαίου

Στο συγκεκριμένο σενάριο επιλέχθηκε ως υπόθεση το χαμηλό κόστος του πετρελαίου με αύξηση 30% της αρχικής μέσης τιμής που είχε επιλεγθεί στο βασικό σενάριο, από 1,30 €/λίτρο σε 1,69€/λίτρο. Το κόστος του πετρελαίου λειτουργεί ως παράμετρος τόσο στα πετρελαιοκίνητα, όσο και στα υβριδικά λεωφορεία, τα οποία λειτουργούν με συνδυασμό ηλεκτρικής ενέργειας και πετρελαίου. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι και οι περιορισμοί παραμένουν ίδιοι.

**Πίνακας 5.13:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου υψηλού κόστους πετρελαίου

|                             | τελ. κόστος     | χρησιμοποιούνται |          |            |               | πωλούνται       |          |            |               | αγοράζονται     |          |            |               | ποσοστό των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               | μ.ο. ηλικίας λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               |
|-----------------------------|-----------------|------------------|----------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|---------------|---|----------|------------|---------------|--|----------|------------|---------------|
|                             |                 | πετρελαιοκίνητα  | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                             | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                              | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα |
| 1. ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ           | € 1.006.657.050 | 276              | 275      | 1183       | 627           | 600             | 375      | 660        | 376           | 151             | 0        | 793        | 417           | 12%   | 12%      | 50%        | 27%           | 6,4  | 10,2     | 7,0        | 7,8           |
| 11. Υψηλό Κόστος Πετρελαίου | € 1.021.361.078 | 40               | 175      | 1319       | 806           | 600             | 375      | 680        | 490           | 0               | 0        | 899        | 596           | 2%  | 7%       | 56%        | 34%           | 1,0  | 10,6     | 6,4        | 7,7           |
| Μεταβολή από βασικό σενάριο | 1%              | -86%             | -36%     | 11%        | 29%           | 0%              | 0%       | 3%         | 30%           | -100%           | x        | 13%        | 43%           | -85%  | -36%     | 12%        | 30%           | -84%   | 4%       | -9%        | -1%           |

**Πίνακας 5.14:** Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος πετρελαίου

| ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ |                   |          |              |               |           |
|-------------------------|-------------------|----------|--------------|---------------|-----------|
|                         | πετρελαιοκίνητα   | υβριδικά | φυσικό αέριο | ηλεκτροκίνητα | ΣΥΝΟΛΟ    |
| 1ος όρος                | 0                 | 0        | 263088664    | 303491869     | 566580533 |
| 2ος όρος                | 56100527          | 46081122 | 65494945     | 23075788      | 190752383 |
| 3ος όρος                | 3056130           | 51482226 | 359934672    | 231059901     | 645532928 |
| <b>ΤΕΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ</b>    | <b>1021361078</b> |          |              |               |           |



**Σχήμα 5.28:** Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος πετρελαίου



**Σχήμα 5.29:** Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος πετρελαίου

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι χρήσιμο να αναφερθούν τα εξής στοιχεία:

- Για τα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται:
  - α) Το 34% είναι ηλεκτροκίνητα, το 56% είναι φυσικού αερίου, το 7% είναι υβριδικά και οριακά μηδενική είναι η χρήση των πετρελαιοκίνητων.
  - β) Τα υβριδικά χρησιμοποιούνται μόνο τα πρώτα 8 χρόνια του μοντέλου με μέσο όρο ηλικίας τα 7,6 έτη; τα λεωφορεία φυσικού αερίου και τα ηλεκτροκίνητα χρησιμοποιούνται κάθε χρόνο κατά τη διάρκεια των 20 ετών με μέσο όρο ηλικίας περίπου τα 10 έτη.
- Για τα λεωφορεία που πωλούνται:
  - α) Το 28% είναι πετρελαιοκίνητα, το 32% είναι φυσικού αερίου, το 17% υβριδικά και το 23% ηλεκτροκίνητα.
  - β) Όλα τα πετρελαιοκίνητα πωλούνται τα 2 πρώτα έτη του πλάνου; τα υβριδικά και τα λεωφορεία φυσικού αερίου έχουν πωληθεί μέχρι το 9<sup>ο</sup> έτος του πλάνου; τα ηλεκτροκίνητα πωλούνται μέχρι και το 16<sup>ο</sup> έτος του πλάνου.
- Για τα λεωφορεία που αγοράζονται:
  - α) Ποσοστιαία αγοράζονται κατά τη διάρκεια του πλάνου 60% λεωφορεία φυσικού αερίου, 40% ηλεκτροκίνητα και μηδενικές αγορές πραγματοποιούνται για υβριδικά και πετρελαιοκίνητα.
  - β) Αγορές λεωφορείων φυσικού αερίου πραγματοποιούνται από το 3<sup>ο</sup> μέχρι και το 16<sup>ο</sup> έτος; ηλεκτροκίνητα λεωφορεία αγοράζονται αποκλειστικά τα έτη 1,2,7,8.

**Συγκριτικά** με το βασικό σενάριο τα στοιχεία που χρήζουν αναφοράς είναι τα εξής:

- Η αναμενόμενη μείωση κατά 86% και 36% των πετρελαιοκίνητων και των υβριδικών που χρησιμοποιούνται.
- Σε σχέση με το βασικό σενάριο που αγοράζονται 150 περίπου πετρελαιοκίνητα, τώρα αποφεύγεται η αγορά τους λόγω της αύξησης της τιμής του καυσίμου που χρησιμοποιεί και επηρεάζει τη κόστος λειτουργίας τους.
- Ευνοούνται αλλά σε μικρό βαθμό οι αγορές και οι λεωφορειοχρήσεις των ηλεκτροκίνητων και των λεωφορείων φυσικού αερίου σε σύγκριση με το βασικό σενάριο.

#### 5.4.12 Αποτελέσματα για χαμηλό κόστος ηλεκτρισμού

Στο συγκεκριμένο σενάριο επιλέχθηκε ως υπόθεση το χαμηλό κόστος του ηλεκτρισμού με μείωση 30% της αρχικής μέσης τιμής που είχε επιλεγεί στο βασικό σενάριο, από 0,20€/kwh σε 0,14€/kwh. Το κόστος του ηλεκτρισμού λειτουργεί ως παράμετρος μόνο στα ηλεκτροκίνητα λεωφορεία. Όσον αφορά τα υβριδικά λεωφορεία, τα οποία λειτουργούν με συνδυασμό ηλεκτρικής ενέργειας και πετρελαίου, για να αποφευχθεί ο πολύπλοκος υπολογισμός του κόστους και των δύο ενεργειών που καταναλώνονται (ηλεκτρισμός-πετρέλαιο), επιλέχθηκε απλοποιητικά να υπερισχύει ως καταναλώμενη ενέργεια αυτή του πετρελαίου με καλύτερη όμως αποδοτικότητα του κινητήρα. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι και οι περιορισμοί παραμένουν ίδιοι.

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

Formatted: Font: 12 pt

**Πίνακας 5.15:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου χαμηλού κόστους ηλεκτρισμού

|                               | τελ. κόστος     | χρησιμοποιούνται |          |            |               | πωλούνται     |             |               |                 | αγοράζονται |            |               |                 | ποσοστό των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |            |               |                 | μ.ο. ηλικίας λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |            |               |     |
|-------------------------------|-----------------|------------------|----------|------------|---------------|---------------|-------------|---------------|-----------------|-------------|------------|---------------|-----------------|---|------------|---------------|-----------------|--|------------|---------------|-----|
|                               |                 | πετρελαιοκίνητα  | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελακίνητα | φυσ.αερίδια | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά    | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά                                    | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά                                     | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα |     |
| 1. ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ             | € 1.006.657.050 | 276              | 275      | 1183       | 627           | 600           | 375         | 660           | 376             | 151         | 0          | 793           | 417             | 12%   | 12%        | 50%           | 27%             | 6,4  | 10,2       | 7,0           | 7,8 |
| 2α. Χαμηλό κόστος ηλεκτρισμού | € 966.341.356   | 344              | 300      | 622        | 1149          | 600           | 375         | 566           | 579             | 299         | 0          | 232           | 939             | 14%   | 12%        | 26%           | 48%             | 2,8  | 10,2       | 7,6           | 7,5 |
| Μεταβολή από βασικό σενάριο   | -4%             | 25%              | 9%       | -47%       | 83%           | 0%            | 0%          | -14%          | 54%             | 98%         | x          | -71%          | 125%            | 22%   | 7%         | -49%          | 79%             | -56%   | 0%         | 9%            | -4% |

**Πίνακας 5.16:** Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος ηλεκτρισμού

Formatted: Font: 12 pt, Bold

| ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ |                  |          |              |               |           |
|-------------------------|------------------|----------|--------------|---------------|-----------|
|                         | πετρελαιοκίνητα  | υβριδικά | φυσικό αέριο | ηλεκτροκίνητα | ΣΥΝΟΛΟ    |
| 1ος όρος                | 55858292         | 0        | 68027400     | 469491465     | 593377157 |
| 2ος όρος                | 55830553         | 36618050 | 54388993     | 26904718      | 173742313 |
| 3ος όρος                | 64511706         | 66542944 | 131971914    | 283679948     | 546706512 |
| <b>ΤΕΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ</b>    | <b>966341356</b> |          |              |               |           |





**Σχήμα 5.30:** Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος ηλεκτρισμού



**Σχήμα 5.31:** Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος ηλεκτρισμού

Από τα παραπάνω διαγράμματα και πίνακες είναι χρήσιμο να αναφερθούν τα εξής στοιχεία:

- Για τα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται:
  - α) Το 48% είναι ηλεκτροκίνητα, το 26% είναι φυσικού αερίου, ενώ από 14% είναι τα πετρελαιοκίνητα και 12% τα υβριδικά.
  - β) Τα πετρελαιοκίνητα χρησιμοποιούνται καθ' όλη τη διάρκεια του πλάνου εκτός από το 7<sup>ο</sup> έως το 15<sup>ο</sup> έτος με πολύ μικρό μέσο όρο ηλικίας τα 3 έτη; τα υβριδικά μέχρι και το 8<sup>ο</sup> έτος με μέσο όρο ηλικίας τα 10 έτη; τα λεωφορεία φυσικού αερίου χρησιμοποιούνται συνεχώς, όπως και τα ηλεκτροκίνητα με μέσο όρο ηλικίας τα 7,5 έτη.
- Για τα λεωφορεία που πωλούνται:
  - α) Το 28% είναι πετρελαιοκίνητα, από 27% είναι φυσικού αερίου και ηλεκτροκίνητα και το 18% υβριδικά.
  - β) Το 99% των πετρελαιοκίνητων έχουν πωληθεί μέχρι το 2<sup>ο</sup> έτος του πλάνου; τα υβριδικά μέχρι το 9<sup>ο</sup> έτος, όπως και τα λεωφορεία φυσικού αερίου; τα ηλεκτροκίνητα πωλούνται κάθε έτος με εξαίρεση τα 11,20.
- Για τα λεωφορεία που αγοράζονται:
  - α) Ποσοστιαία αγοράζονται κατά τη διάρκεια του πλάνου 64% ηλεκτροκίνητα, 20% πετρελαιοκίνητα, 16% φυσικού αερίου και καθόλου υβριδικά.
  - β) Αγορές πετρελαιοκίνητων πραγματοποιούνται από το 16<sup>ο</sup> μέχρι και το 19<sup>ο</sup> έτος; φυσικού αερίου αγοράζονται τα έτη 5 έως 7 και 12 έως 15; Ηλεκτροκίνητα από την έναρξη έως το 10<sup>ο</sup> έτος.

**Συγκριτικά** με το βασικό σενάριο τα στοιχεία που χρήζουν αναφοράς είναι τα εξής:

- Όπως ήταν αναμενόμενο, αγοράζονται και χρησιμοποιούνται κατά 125% και 83% αντίστοιχα περισσότερα ηλεκτροκίνητα.
- Επίσης αυξάνεται η αγορά των πετρελαιοκίνητα σε μεγάλο βαθμό της τάξης του 100%, ενώ μειώνεται των λεωφορείων φυσικού αερίου κατά 70%, το οποίο έχει αντίκτυπο στο μέσο όρο ηλικίας ο οποίος μειώνεται για τα πετρελαιοκίνητα κατά 56% ενώ αυξάνεται για τα λεωφορεία φυσικού αερίου κατά 9%.
- Σημαντική είναι και η μείωση του τελικού κόστους που προκύπτει για τη διαχείριση του στόλου λεωφορείων κατά 4%.

#### 5.4.13 Αποτελέσματα για υψηλό κόστος ηλεκτρισμού

Στο συγκεκριμένο σενάριο επιλέχθηκε ως υπόθεση το υψηλό κόστος του ηλεκτρισμού με μείωση 30% της αρχικής μέσης τιμής που είχε επιλεγεί στο βασικό σενάριο, από 0,20€/kwh σε 0,26€/kwh. Το κόστος του ηλεκτρισμού λειτουργεί ως παράμετρος μόνο στα ηλεκτροκίνητα λεωφορεία. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι και οι περιορισμοί παραμένουν ίδιοι.

**Πίνακας 5.17:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου υψηλού κόστους πετρελαίου

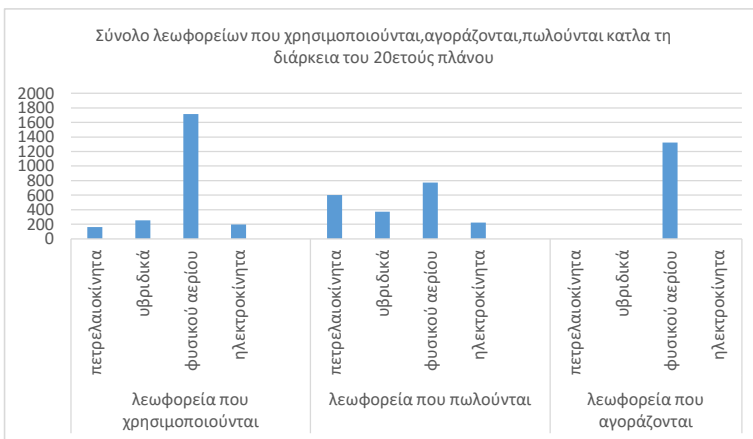
|                              | τελ. κόστος     | χρησιμοποιούνται |          |            |               | πωλούνται       |          |            |               | αγοράζονται     |          |            |               | ποσοστό των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               | μ.ο. ηλικίας λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               |
|------------------------------|-----------------|------------------|----------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|---------------|---|----------|------------|---------------|--|----------|------------|---------------|
|                              |                 | πετρελαιοκίνητα  | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                             | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                              | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα |
| 1. ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ            | € 1.006.657.050 | 276              | 275      | 1183       | 627           | 600             | 375      | 660        | 376           | 151             | 0        | 793        | 417           | 12%   | 12%      | 50%        | 27%           | 6,4  | 10,2     | 7,0        | 7,8           |
| 15. Υψηλό Κόστος Ηλεκτρισμού | € 1.013.174.212 | 160              | 255      | 1715       | 195           | 600             | 375      | 775        | 225           | 0               | 0        | 1325       | 0             | 7%  | 11%      | 74%        | 8%            | 10,3   | 10,1     | 6,9        | 9,6           |
| Μεταβολή από βασικό σενάριο  | 1%              | -42%             | -7%      | 45%        | -69%          | 0%              | 0%       | 17%        | -40%          | -100%           | x        | 67%        | -100%         | -41%  | -6%      | 47%        | -68%          | 62%  | -1%      | -1%        | 23%           |

**Πίνακας 5.18:** Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος ηλεκτρισμού

| ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ |                   |          |              |               |           |
|-------------------------|-------------------|----------|--------------|---------------|-----------|
|                         | πετρελαιοκίνητα   | υβριδικά | φυσικό αέριο | ηλεκτροκίνητα | ΣΥΝΟΛΟ    |
| 1ος όρος                | 0                 | 0        | 402734532    | 0             | 402734532 |
| 2ος όρος                | 49708725          | 36620971 | 79284885     | 11401419      | 177016000 |
| 3ος όρος                | 53688466          | 65612196 | 622926987    | 45228031      | 787455680 |
| <b>ΤΕΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ</b>    | <b>1013174212</b> |          |              |               |           |



**Σχήμα 5.32:** Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος ηλεκτρισμού



**Σχήμα 5.33:** Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος ηλεκτρισμού

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι χρήσιμο να αναφερθούν τα εξής στοιχεία:

Για τα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται:

Το 74% είναι φυσικού αερίου, το 8% είναι ηλεκτροκίνητα, ενώ από 11% και 7% είναι τα υβριδικά και τα πετρελαιοκίνητα.

Τα πετρελαιοκίνητα χρησιμοποιούνται μέχρι το 7<sup>ο</sup> έτος με μέσο όρο ηλικίας τα 10,3 έτη, τα υβριδικά μέχρι και το 8<sup>ο</sup> έτος με μ.ο. ηλικίας τα 10 έτη, τα λεωφορεία φυσικού αερίου χρησιμοποιούνται συνεχώς με μ.ο. ηλικίας 6,9 έτη, όπως και τα ηλεκτροκίνητα εκτός από τα τελευταία 6 έτη με μ.ο. ηλικίας τα 9,6 έτη.

Για τα λεωφορεία που πωλούνται:

Το 30% είναι πετρελαιοκίνητα, από 39% είναι φυσικού αερίου, το 12% ηλεκτροκίνητα και το 19% υβριδικά.

Το 80% των πετρελαιοκίνητων έχει πωληθεί μέχρι το 2<sup>ο</sup> έτος του πλάνου; όλα τα υβριδικά μέχρι το 9<sup>ο</sup> έτος, όπως και τα λεωφορεία φυσικού αερίου μέχρι το 10<sup>ο</sup>; τα ηλεκτροκίνητα πωλούνται κάθε έτος μέχρι το 15<sup>ο</sup>.

Για τα λεωφορεία που αγοράζονται:

Ο μοναδικός τύπος λεωφορείων που αγοράζονται κατά τη διάρκεια του πλάνου είναι αυτά που χρησιμοποιούν φυσικό αέριο.

Οι αγορές των λεωφορείων φυσικού αερίου πραγματοποιούνται τα ενδιάμεσα έτη του πλάνου από το 2<sup>ο</sup> έως το 15<sup>ο</sup>.

**Συγκριτικά** με το βασικό σενάριο τα στοιχεία που χρήζουν αναφοράς είναι τα εξής:

Υπάρχει 100% μείωση των ηλεκτροκίνητων που αγοράζονται που οδηγεί στις μηδενικές αγορές τους και παρά το γεγονός ότι μειώνονται οι πωλήσεις τους, χρησιμοποιούνται λιγότερα κατά 70% ηλεκτροκίνητα από αυτά του βασικού σεναρίου καθώς χρησιμοποιούνται μόνο όσα είναι στον αρχικό στόλο με αύξηση του μ.ο. ηλικίας κατά 23%.

Το ίδιο συμβαίνει και με τα πετρελαιοκίνητα για τα οποία μηδενίζονται οι αγορές τους και μειώνονται κατά 42% από αυτά που χρησιμοποιούνται στο βασικό σενάριο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μ.ο. ηλικίας τους κατά 62%.

#### 5.4.14 Αποτελέσματα για χαμηλό κόστος φυσικού αερίου

Στο συγκεκριμένο σενάριο επιλέχθηκε ως υπόθεση το χαμηλό κόστος του φυσικού αερίου με μείωση 30% της αρχικής μέσης τιμής που είχε επιλεγεί στο βασικό σενάριο, από 0,80€/λίτρο σε 0,56€/λίτρο. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι και οι περιορισμοί παραμένουν ίδιοι.

**Πίνακας 5.19:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου χαμηλού κόστους φυσικού αερίου

|                              | τελ. κόστος | χρησιμοποιούνται |          |            |               | πωλούνται |          |            |               | αγοράζονται |          |            |               | ποσοστό των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               | μ.ο. ηλικίας λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               |
|------------------------------|-------------|------------------|----------|------------|---------------|-----------|----------|------------|---------------|-------------|----------|------------|---------------|---|----------|------------|---------------|--|----------|------------|---------------|
|                              |             | πετρέλαιο        | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρέλαιο | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρέλαιο   | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρέλαιο                                   | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρέλαιο                                    | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα |
| 1. ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ            | 1006657050  | 276              | 275      | 1183       | 627           | 600       | 375      | 660        | 376           | 151         | 0        | 793        | 417           | 12%   | 12%      | 50%        | 27%           | 6,4  | 10,2     | 7,0        | 7,8           |
| 12. Χαμηλό Κόστος Φυσ.Αερίου | 888116766,6 | 40               | 275      | 1920       | 195           | 600       | 375      | 950        | 225           | 0           | 0        | 1500       | 0             | 2%  | 11%      | 79%        | 8%            | 1,0  | 10,6     | 6,8        | 10,2          |
| Μεταβολή από βασικό σενάριο  | -12%        | -86%             | 0%       | 62%        | -69%          | 0%        | 0%       | 44%        | -40%          | -100%       | x        | 89%        | -100%         | -86%  | -3%      | 58%        | -70%          | -84%   | 4%       | -3%        | 31%           |

**Πίνακας 5.20:** Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος φυσικού αερίου

| ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ |                  |          |              |               |           |           |
|-------------------------|------------------|----------|--------------|---------------|-----------|-----------|
|                         | πετρελαιοκίνητα  | υβριδικά | φυσικό αέριο | ηλεκτροκίνητα | ΣΥΝΟΛΟ    |           |
| 1ος όρος                |                  | 0        | 0            | 461128626     | 0         | 461128626 |
| 2ος όρος                | 56100527         | 40944566 | 97799796     | 23514966      | 218359855 |           |
| 3ος όρος                | 2527927          | 58599319 | 553547121    | 30673628      | 645347995 |           |
| <b>ΤΕΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ</b>    | <b>888116767</b> |          |              |               |           |           |



**Σχήμα 5.34:** Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος φυσικού αερίου



**Σχήμα 5.35:** Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για χαμηλό κόστος φυσικού αερίου

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι χρήσιμο να αναφερθούν τα εξής στοιχεία:

Για τα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται:

Το 79% είναι φυσικού αερίου, το 8% είναι ηλεκτροκίνητα, 11% είναι υβριδικά και 3% τα πετρελαιοκίνητα.

Τα υβριδικά χρησιμοποιούνται μέχρι και το 8<sup>ο</sup> έτος του πλάνου με μ.ο. ηλικίας τα 10,6 έτη, τα ηλεκτροκίνητα μέχρι το 12<sup>ο</sup> με μ.ο. ηλικίας τα 10,2 έτη, τα λεωφορεία φυσικού αερίου χρησιμοποιούνται συνεχώς με μ.ο. ηλικίας τα 6,8 έτη.

Για τα λεωφορεία που πωλούνται:

Το 28% είναι πετρελαιοκίνητα, από 44% είναι φυσικού αερίου, το 11% ηλεκτροκίνητα και το 17% υβριδικά.

Το 100% των πετρελαιοκίνητων έχει πωληθεί μέχρι το 2<sup>ο</sup> έτος του πλάνου; όλα τα υβριδικά μέχρι το 9<sup>ο</sup> έτος, όπως και τα λεωφορεία φυσικού αερίου μέχρι το 10<sup>ο</sup>; τα ηλεκτροκίνητα πωλούνται κάθε έτος μέχρι το 13<sup>ο</sup>.

Για τα λεωφορεία που αγοράζονται:

Ο μοναδικός τύπος λεωφορείων που αγοράζονται κατά τη διάρκεια του πλάνου είναι αυτά που χρησιμοποιούν φυσικό αέριο.

Οι αγορές των λεωφορείων φυσικού αερίου πραγματοποιούνται τα ενδιάμεσα έτη του πλάνου από το 1<sup>ο</sup> έως το 13<sup>ο</sup>.

**Συγκριτικά** με το βασικό σενάριο τα στοιχεία που χρήζουν αναφοράς είναι τα εξής:

Η αύξηση κατά 89% του λεωφορείων φυσικού αερίου που αγοράζονται είναι αναμενόμενο να οδηγεί και στην αύξηση κατά 62% για αυτά που χρησιμοποιούνται με μικρή μείωση του μ.ο. ηλικίας τους που παραμένει κοντά στα 7 έτη.

Επίσης υπάρχει μείωση κατά 100% των πετρελαιοκίνητων και των ηλεκτροκίνητων που αγοράζονται με αποτέλεσμα τα λεωφορεία αυτών των τύπων που χρησιμοποιούνται να κατέχουν ένα πολύ μικρό ποσοστό από τα λεωφορεία του στόλου που χρησιμοποιούνται.

Το τελικό κόστος που προκύπτει για τη διαχείριση του στόλου μειώνεται κατά 12% από αυτό του βασικού σεναρίου, γεγονός που δείχνει πως η λειτουργία περισσότερων λεωφορείων φυσικού αερίου σε συνδυασμό με τις ενέργειες που εκτελούνται για τους υπόλοιπους τύπους λεωφορείων είναι αρκετά οικονομική.



#### 5.4.15 Αποτελέσματα για υψηλό κόστος του φυσικού αερίου

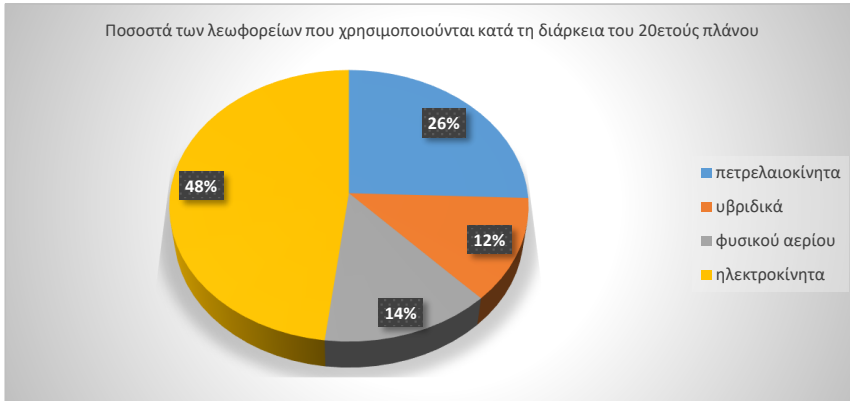
Στο συγκεκριμένο σενάριο επιλέχθηκε ως υπόθεση το χαμηλό κόστος του φυσικού αερίου με αύξηση 30% της αρχικής μέσης τιμής που είχε επιλεγεί στο βασικό σενάριο, από 0,80€/λίτρο σε 1,30€/λίτρο. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι και οι περιορισμοί παραμένουν ίδιοι.

**Πίνακας 5.21:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου υψηλού κόστους φυσικού αερίου

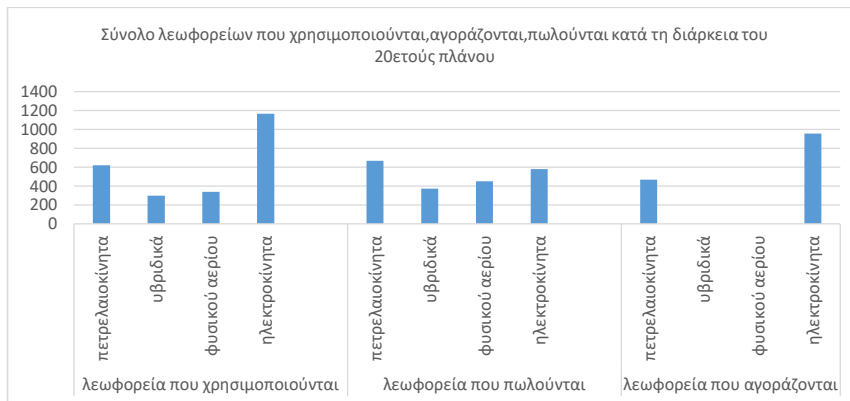
|  | τελ. κόστος     | χρησιμοποιούνται |          |            |               | πωλούνται       |          |            |               | αγοράζονται     |          |            |               | ποσοστά των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               | μ.ο. ηλικίας λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               |     |
|--|-----------------|------------------|----------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|---------------|---|----------|------------|---------------|--|----------|------------|---------------|-----|
|  |                 | πετρελαιοκίνητα  | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                             | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                              | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα |     |
| 1. ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ  | € 1.006.657.050 | 276              | 275      | 1183       | 627           | 600             | 375      | 660        | 376           | 151             | 0        | 793        | 417           | 12%   | 12%      | 50%        | 27%           | 6,4  | 10,2     | 7,0        | 7,8           |     |
| 15. Υψηλό Κόστος Ηλεκτρορισμού Μεταβολή από βασικό σενάριο | € 1.013.174.212 | 160              | 255      | 1715       | 195           | 600             | 375      | 775        | 225           | 0               | 0        | 1325       | 0             | 7%  | 11%      | 74%        | 8%            | 10,3   | 10,1     | 6,9        | 9,6           |     |
|  |                 | 1%               | -42%     | -7%        | 45%           | -69%            | 0%       | 0%         | 17%           | -40%            | -100%    | x          | 67%           | -100%                                       | -41%     | -6%        | 47%           | -68%   | 62%      | -1%        | -1%           | 23% |

**Πίνακας 5.22:** Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος φυσικού αερίου

| ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ |                   |          |              |               |           |
|-------------------------|-------------------|----------|--------------|---------------|-----------|
|                         | πετρελαιοκίνητα   | υβριδικά | φυσικό αέριο | ηλεκτροκίνητα | ΣΥΝΟΛΟ    |
| 1ος όρος                | 90258684          | 0        | 0            | 475582749     | 565841433 |
| 2ος όρος                | 63256778          | 36092569 | 37293971     | 27123669      | 163766987 |
| 3ος όρος                | 135658901         | 68658696 | 91572199     | 330086752     | 625976548 |
| <b>ΤΕΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ</b>    | <b>1028050994</b> |          |              |               |           |



**Σχήμα 5.36:** Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος φυσικού αερίου



**Σχήμα 5.37:** Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για υψηλό κόστος φυσικού αερίου

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι χρήσιμο να αναφερθούν τα εξής στοιχεία:

Για τα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται:

Το 48% είναι ηλεκτροκίνητα, το 26% είναι πετρελαιοκίνητα, 14% είναι φυσικού αερίου και 12% υβριδικά.

Τα πετρελαιοκίνητα χρησιμοποιούνται μόνο τα έτη 1,2,7,8 με μ.ο. ηλικίας τα 5 έτη; τα υβριδικά και του φυσικού αερίου μέχρι και το 9<sup>ο</sup> έτος με μ.ο. ηλικίας τα 10 έτη; τα ηλεκτροκίνητα χρησιμοποιούνται συνεχώς με εξαίρεση τα έτη 11,12 και μ.ο. ηλικίας τα 7,4 έτη.

Για τα λεωφορεία που πωλούνται:

Το 28% είναι πετρελαιοκίνητα, από 44% είναι φυσικού αερίου, το 11% ηλεκτροκίνητα και το 17% υβριδικά.

Τα πετρελαιοκίνητα πωλούνται τα έτη 1,2,7,8; όλα τα υβριδικά μέχρι το 9<sup>ο</sup> έτος, όπως και τα λεωφορεία φυσικού αερίου; τα ηλεκτροκίνητα πωλούνται κάθε έτος με εξαίρεση το 11<sup>ο</sup> και το 12<sup>ο</sup>.

Για τα λεωφορεία που αγοράζονται:

Το 67% αποτελείται από ηλεκτροκίνητα και το υπόλοιπο 33% από πετρελαιοκίνητα.

Οι αγορές των πετρελαιοκίνητων πραγματοποιούνται το 6<sup>ο</sup> έτος και από το 13<sup>ο</sup> έως το 19<sup>ο</sup>, ενώ τα ηλεκτροκίνητα από το 2<sup>ο</sup> έως το 10<sup>ο</sup>.

Συγκριτικά με το βασικό σενάριο τα στοιχεία που χρήζουν αναφοράς είναι τα εξής:

Η μείωση κατά 100% των λεωφορείων φυσικού αερίου που αγοράζονται και κατά 71% των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται, ποσοστά που σε συνδυασμό με τη μείωση των πωλήσεων κατά 32% οδηγούν στην αύξηση του μ.ο. ηλικίας τους κατά 45%.

Ευνοείται η αγορά και χρήση πετρελαιοκίνητων (211% και 125% αντίστοιχα) και ηλεκτροκίνητων (129% και 86% αντίστοιχα) με αποτέλεσμα και τη μείωση του μέσου όρου ηλικίας όσων χρησιμοποιούνται από αυτούς τους δύο τύπους.

#### 5.4.16 Αποτελέσματα για επιβολή προστίμου από την εκπομπή καυσαερίων

Στο συγκεκριμένο σενάριο επιλέχθηκε ως υπόθεση η ύπαρξη προστίμου για τα λεωφορεία που εκπέμπουν καυσαέρια όπως αυτό του διοξειδίου του άνθρακα. Σκοπός του σεναρίου είναι η ένδειξη των μεταβολών όχι τόσο στο τελικό κόστος της διαχείρισης του στόλου λεωφορείων αλλά κυρίως στις μεταβολές στη χρήση και αγορά λεωφορείων που είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον. Η πολιτική που εφαρμόζεται για τη μείωση των εκπομπών καυσαερίων που προέρχονται από τα οχήματα και ρυπαίνουν το περιβάλλον διαφέρει από χώρα σε χώρα. Είναι γεγονός πως γίνεται παγκόσμια προσπάθεια για τη μείωση των καυσαερίων του θερμοκηπίου και κυρίως του διοξειδίου του άνθρακα. Νέες τεχνολογίες οχημάτων και κινητήρων (‘‘πράσινη τεχνολογία’’), όπως είναι τα ηλεκτροκίνητα, κατασκευάζονται για το σκοπό αυτό. Η τιμή που χρησιμοποιήθηκε ως πρόστιμο της εκπομπής του διοξειδίου του άνθρακα είναι 100€/τόνο CO<sub>2</sub>, η οποία προκύπτει από την έρευνα των Peet et al., 2010, Wayne et al., 2009.

**Πίνακας 5.23:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου επιβολής προστίμου για εκπομπή καυσαερίων

|  | τελ. κόστος     | χρησιμοποιούνται |          |            |               | πωλούνται       |          |            |               | αγοράζονται     |          |            |               | ποσοστό των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               | μ.ο. ηλικίας λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |            |               |
|--|-----------------|------------------|----------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|---------------|-----------------|----------|------------|---------------|---|----------|------------|---------------|--|----------|------------|---------------|
|  |                 | πετρελαιοκίνητα  | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                             | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                              | υβριδικά | φυσ.αερίου | ηλεκτροκίνητα |
| 1. ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ                            | € 1.006.657.050 | 276              | 275      | 1183       | 627           | 600             | 375      | 660        | 376           | 151             | 0        | 793        | 417           | 12%   | 12%      | 50%        | 27%           | 6,4  | 10,2     | 7,0        | 7,8           |
| 16. Επιβολή προστίμου για εκπομπή καυσαερίων | € 1.065.241.958 | 205              | 275      | 695        | 1185          | 600             | 375      | 565        | 585           | 165             | 0        | 335        | 975           | 9%  | 12%      | 29%        | 50%           | 2,1  | 10,1     | 6,9        | 7,4           |
| Μεταβολή από βασικό σενάριο                  | 6%              | -26%             | 0%       | -41%       | 89%           | 0%              | 0%       | -14%       | 56%           | 9%              | x        | -58%       | 134%          | -26%  | 0%       | -41%       | 89%           | -67%   | 0%       | -2%        | -5%           |

**Πίνακας 5.24:** Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για επιβολή προστίμου για εκπομπή του CO<sub>2</sub>

| ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ |                   |          |              |               |           |
|-------------------------|-------------------|----------|--------------|---------------|-----------|
|                         | πετρελαιοκίνητα   | υβριδικά | φυσικό αέριο | ηλεκτροκίνητα | ΣΥΝΟΛΟ    |
| 1ος όρος                | 30465347          | 0        | 95225417     | 487258066     | 612948830 |
| 2ος όρος                | 56100527          | 36811650 | 54413393     | 28321847      | 175647416 |
| 3ος όρος                | 34555500          | 76277041 | 174911288    | 342196715     | 627940544 |
| <b>ΤΕΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ</b>    | <b>1065241958</b> |          |              |               |           |



**Σχήμα 5.38:** Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για επιβολή προστίμου για εκπομπή του CO<sub>2</sub>



**Σχήμα 5.39:** Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για επιβολή προστίμου για εκπομπή CO<sub>2</sub>

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι χρήσιμο να αναφερθούν τα εξής στοιχεία:

- Για τα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται:
  - α) Το 50% είναι ηλεκτροκίνητα, το 29% είναι φυσικού αερίου, 12% είναι υβριδικά και 9% πετρελαιοκίνητα.
  - β) Τα πετρελαιοκίνητα χρησιμοποιούνται μόνο το 1<sup>ο</sup> και τα τελευταία 4 έτη με εξαιρετικά μικρό μ.ο. ηλικίας τα 2,1 έτη; τα υβριδικά τα 8 πρώτα έτη με μ.ο. ηλικίας τα 10 έτη; του φυσικού αερίου τα πρώτα 8 και τα τελευταία 7 έτη με μ.ο. ηλικίας τα 6,9 έτη; τα ηλεκτροκίνητα συνεχώς με μ.ο. ηλικίας τα 7,4 έτη.
- Για τα λεωφορεία που πωλούνται:
  - α) Το 28% είναι πετρελαιοκίνητα, από 27% είναι φυσικού αερίου, το 27% ηλεκτροκίνητα και το 18% υβριδικά.
  - β) Τα πετρελαιοκίνητα πωλούνται τα έτη 1 και 2; όλα τα υβριδικά μέχρι το 9<sup>ο</sup> έτος, όπως και τα λεωφορεία φυσικού αερίου; τα ηλεκτροκίνητα πωλούνται κάθε έτος με εξαίρεση το 11<sup>ο</sup>, 12<sup>ο</sup>, 13<sup>ο</sup>.
- Για τα λεωφορεία που αγοράζονται:
  - α) Το 66% αποτελείται από ηλεκτροκίνητα, το 11% από πετρελαιοκίνητα και το υπόλοιπο 23% από φυσικού αερίου.
  - β) Οι αγορές των πετρελαιοκίνητων πραγματοποιούνται τα έτη 17,18,19, τα υβριδικά τα έτη 5,6,14,15,16 και τα ηλεκτροκίνητα τα πρώτα 10 έτη.

**Συγκριτικά** με το βασικό σενάριο τα στοιχεία που χρήζουν αναφοράς είναι τα εξής:

- Η αύξηση αγοράς κατά 134% και χρήσης κατά 89% των ηλεκτροκίνητων, που δικαιολογείται καθώς αυτός ο τύπος λεωφορείων είναι ο λιγότερο ρυπογόνος από τους υπόλοιπους.
- Μικρή μείωση κατά 26% παρατηρείται στα πετρελαιοκίνητα που χρησιμοποιούνται αλλά μεγάλη μείωση κατά 67% έχει ο μέσος όρος ηλικίας τους, που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι υπάρχει προτίμηση νέων λεωφορείων που δεν επηρεάζονται τόσο από την ύπαρξη προστίμου καθώς η αποδοτικότητα του κινητήρα τους και συνεπώς η εκπομπή καυσαερίων είναι λιγότερη.
- Υπάρχει αύξηση κατά 6% του τελικού κόστους, αποτέλεσμα της αγοράς μεγάλου ποσοστού ηλεκτροκίνητων αλλά και της ύπαρξης του ίδιου του προστίμου για όσα λεωφορεία χρησιμοποιούνται.

#### 5.4.17 Αποτελέσματα για προϋπολογισμό αγοράς λεωφορείων 40.000.000 ανά έτος

Στο συγκεκριμένο σενάριο μεταβάλλεται το ποσό που παρέχεται στον Ο.Α.Σ.Α. για αγορές νέων λεωφορείων κάθε έτος από τα 100.000.000 € στα 40.000.000 €, μείωση 60%. Το συγκεκριμένο ποσό που μεταβάλλεται είναι το ανώτατο όριο των χρημάτων που διατίθενται για την αγορά νέων οχημάτων και εισέρχεται στο μοντέλο βελτιστοποίησης με τη μορφή του 1<sup>ου</sup> περιορισμού που έχει αναφερθεί στο υποκεφάλαιο 4.5.2. Οι υπόλοιποι περιορισμοί και παράμετροι παραμένουν αμετάβλητοι, όπως στο βασικό σενάριο.

**Πίνακας 5.25:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σεναρίου για προϋπολογισμό αγορών 40.000.000€

|                               | τελ. κόστος     | χρησιμοποιούνται |          |                |               | πωλούνται       |          |                |               | αγοράζονται     |          |                |               | ποσοστό των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |                |               | μ.ο. ηλικίας λεωφορείων που χρησιμοποιούνται |          |                |               |    |
|-------------------------------|-----------------|------------------|----------|----------------|---------------|-----------------|----------|----------------|---------------|-----------------|----------|----------------|---------------|---|----------|----------------|---------------|--|----------|----------------|---------------|----|
|                               |                 | πετρελαιοκίνητα  | υβριδικά | φυσικού αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσικού αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα | υβριδικά | φυσικού αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                             | υβριδικά | φυσικού αερίου | ηλεκτροκίνητα | πετρελαιοκίνητα                              | υβριδικά | φυσικού αερίου | ηλεκτροκίνητα |    |
| 1. ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ             | € 1.006.657.050 | 276              | 275      | 1183           | 627           | 600             | 375      | 660            | 376           | 151             | 0        | 793            | 417           | 12%   | 12%      | 50%            | 27%           | 6,4  | 10,2     | 7,0            | 7,8           |    |
| 17. Προϋπολογισμός 40.000.000 | € 1.020.465.780 | 354              | 275      | 1175           | 551           | 600             | 375      | 520            | 572           | 285             | 0        | 785            | 347           | 15%   | 12%      | 50%            | 23%           | 3,8  | 10,4     | 7,0            | 8,0           |    |
| Μεταβολή από βασικό σενάριο   |                 | 1%               | 28%      | 0%             | -1%           | -12%            | 0%       | 0%             | -21%          | 52%             | 89%      | x              | -1%           | -17%  | 29%      | 0%             | 0%            | -12%   | -40%     | 2%             | 0%            | 3% |

**Πίνακας 5.26:** Συνολικά κόστη των λεωφορείων στο τέλος του 20ετούς πλάνου για όριο προϋπολογισμού αγορών 40.000.000€

| ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ |                   |          |              |               |           |
|-------------------------|-------------------|----------|--------------|---------------|-----------|
|                         | πετρελαιοκίνητα   | υβριδικά | φυσικό αέριο | ηλεκτροκίνητα | ΣΥΝΟΛΟ    |
| 1ος όρος                | 52817227          |          | 0            | 231000226     | 181307563 |
| 2ος όρος                | 54534677          | 35504930 |              | 34743275      | 26433284  |
| 3ος όρος                | 64636535          | 71643269 |              | 413923707     | 156353420 |
| <b>ΤΕΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ</b>    | <b>1020465780</b> |          |              |               |           |



**Σχήμα 5.40:** Ποσοστά των διαφόρων τύπων λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για όριο προϋπολογισμού αγορών 40.000.000€



**Σχήμα 5.41:** Συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται, αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου για όριο περιορισμού αγορών 40.000.000€



Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι χρήσιμο να αναφερθούν τα εξής στοιχεία:

Για τα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται:

Το 23% είναι ηλεκτροκίνητα, το 50% είναι φυσικού αερίου, 12% είναι υβριδικά και 15% πετρελαιοκίνητα.

Τα πετρελαιοκίνητα χρησιμοποιούνται όλα τα έτη εκτός από τα ενδιάμεσα 7<sup>ο</sup>-15<sup>ο</sup> με μ.ο. ηλικίας 3,8 έτη; τα υβριδικά τα 10 πρώτα έτη με μ.ο. ηλικίας τα 10,4 έτη; του φυσικού αερίου και τα ηλεκτροκίνητα συνεχώς με μ.ο. ηλικίας τα 7 και 8 έτη αντίστοιχα.

Για τα λεωφορεία που πωλούνται:

Το 29% είναι πετρελαιοκίνητα, από 25% είναι φυσικού αερίου, το 28% ηλεκτροκίνητα και το 18% υβριδικά.

Το 95% των πετρελαιοκίνητων πωλείται τα 2 πρώτα έτη; όλα τα υβριδικά μέχρι το 11<sup>ο</sup> έτος, όπως και τα λεωφορεία φυσικού αερίου; τα ηλεκτροκίνητα πωλούνται κάθε έτος με εξαίρεση το τελευταίο .

Για τα λεωφορεία που αγοράζονται:

Το 55% αποτελείται από φυσικού αερίου, το 25% από ηλεκτροκίνητα και το υπόλοιπο 20% από πετρελαιοκίνητα.

Οι αγορές των πετρελαιοκίνητων πραγματοποιούνται τα έτη 16,17,18,19, του φυσικού αερίου από το 6<sup>ο</sup> έως το 15<sup>ο</sup> και τα ηλεκτροκίνητα τα πρώτα 5 έτη.

Συγκριτικά με το βασικό σενάριο τα στοιχεία που χρήζουν αναφοράς είναι τα εξής:

Ο μοναδικός τύπος λεωφορείων που παρουσιάζει αξιόλογες μεταβολές από το βασικό σενάριο είναι τα πετρελαιοκίνητα καθώς αγοράζονται κατά 89% περισσότερα και ο μ.ο. ηλικίας τους μειώνεται κατά 40%. Η μείωση του προϋπολογισμού αγορών οδήγησε

ξεκάθαρα στην αγορά φθηνότερων λεωφορείων, ενώ παράλληλα χρησιμοποιούνται περίπου όσα λεωφορεία χρησιμοποιούνταν και στο βασικό σενάριο με αυτά του φυσικού αερίου να είναι τα περισσότερα.

Το τελικό κόστος έχει μικρή αύξηση κατά 1%, γεγονός που δείχνει πως η ενδεχόμενη μείωση του προϋπολογισμού αγορών δεν οδηγεί απαραίτητα σε μείωση του τελικού κόστους καθώς οι ενέργειες που γίνονται για αγορά, χρήση και πώληση των λεωφορείων ισοσταθμίζονται με αυτές του βασικού σεναρίου για την αποτελεσματική λειτουργία του οργανισμού.

#### 5.5 Σύνοψη και Συνολικός Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Προκειμένου να γίνει εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν μετά την επίλυση των 17 διαφορετικών προβλημάτων βελτιστοποίησης και να εξαχθούν στη συνέχεια χρήσιμα συμπεράσματα παρατίθενται τέσσερις συλλογικοί πίνακες αποτελεσμάτων.

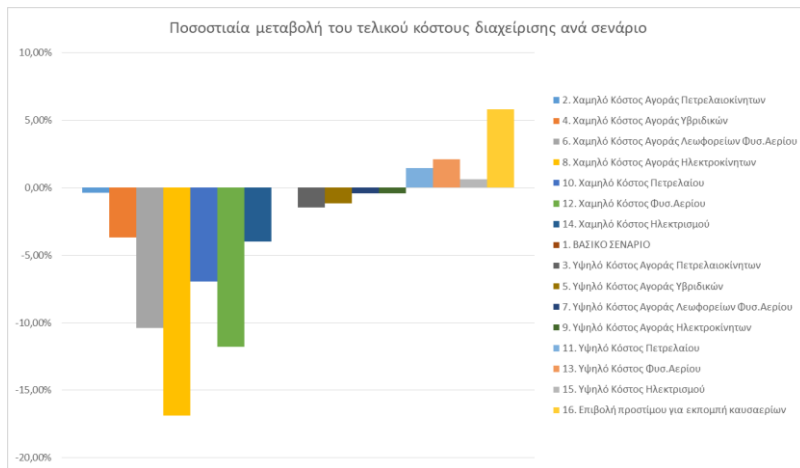
Στον πρώτο πίνακα συμπεριλαμβάνονται σε μία στήλη αριθμημένα όλα τα σενάρια προβλημάτων που επιλύθηκαν, ξεκινώντας από τα σενάρια που μεταβάλλεται το αρχικό κόστος αγοράς των λεωφορείων, συνεχίζοντας με αυτά που μεταβάλλεται το κόστος του καυσίμου και καταλήγοντας στο σενάριο επιβολής προστίμου από την εκπομπή καυσαερίων και σε αυτό της μείωσης του προϋπολογισμού αγοράς νέων λεωφορείων και σε μία σειρά τα στοιχεία που συντελούν στη σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Τα στοιχεία που συλλέγονται από την παραπάνω ανάλυση και παρατίθενται σε σειρά στον πρώτο πίνακα για κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι:

- Η ελάχιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και η ποσοστιαία μεταβολή της από αυτή του βασικού σεναρίου.

**Πίνακας 5.27:** Συγκεντρωτικός πίνακας σύγκρισης του τελικού κόστους όλων των σεναρίων

| Προβλήματα βελτιστοποίησης                     | Συγκριτικά στοιχεία | Ελάχιστη Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης / Τελικό Κόστος | Ποσοστιαία μεταβολή τελικού κόστους από το βασικό σενάριο |
|--|---------------------|---|---|
| 1. ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ                              |                     | 1.006.657.050   | -   |
| 2. Χαμηλό Κόστος Αγοράς Πετρελαιοκίνητων       |                     | 1002843197  | -0,4%   |
| 3. Υψηλό Κόστος Αγοράς Πετρελαιοκίνητων        |                     | 992165137   | -1,4%   |
| 4. Χαμηλό Κόστος Αγοράς Υβριδικών              |                     | 969529060   | -3,7%   |
| 5. Υψηλό Κόστος Αγοράς Υβριδικών               |                     | 995032079   | -1,2%   |
| 6. Χαμηλό Κόστος Αγοράς Λεωφορείων Φυσ. Αερίου |                     | 901977478   | -10,4%  |
| 7. Υψηλό Κόστος Αγοράς Λεωφορείων Φυσ. Αερίου  |                     | 1002544152  | -0,4%   |
| 8. Χαμηλό Κόστος Αγοράς Ηλεκτροκίνητων         |                     | 836810091   | -16,9%  |
| 9. Υψηλό Κόστος Αγοράς Ηλεκτροκίνητων          |                     | 1002526047  | -0,4%   |
| 10. Χαμηλό Κόστος Πετρελαίου                   |                     | 936869655   | -7%   |
| 11. Υψηλό Κόστος Πετρελαίου                    |                     | 1021361078  | 1%  |
| 12. Χαμηλό Κόστος Φυσ. Αερίου                  |                     | 888116767   | -12%  |
| 13. Υψηλό Κόστος Φυσ. Αερίου                   |                     | 1028050994  | 2%  |
| 14. Χαμηλό Κόστος Ηλεκτρισμού                  |                     | 966341356   | -4%   |
| 15. Υψηλό Κόστος Ηλεκτρισμού                   |                     | 1013174212  | 1%  |
| 16. Επιβολή προστίμου για εκπομπή καυσαερίων   |                     | 1065241958  | 6%  |
| 17. Προϋπολογισμός 40.000.000                  |                     | 1020465780  | 1%  |



**Σχήμα 5.42:** Ποσοστιαίες μεταβολές του τελικού κόστους σε κάθε σενάριο

Σε γενική ανάλυση του παραπάνω πίνακα και διαγράμματος τα στοιχεία που εξάγονται είναι τα εξής:

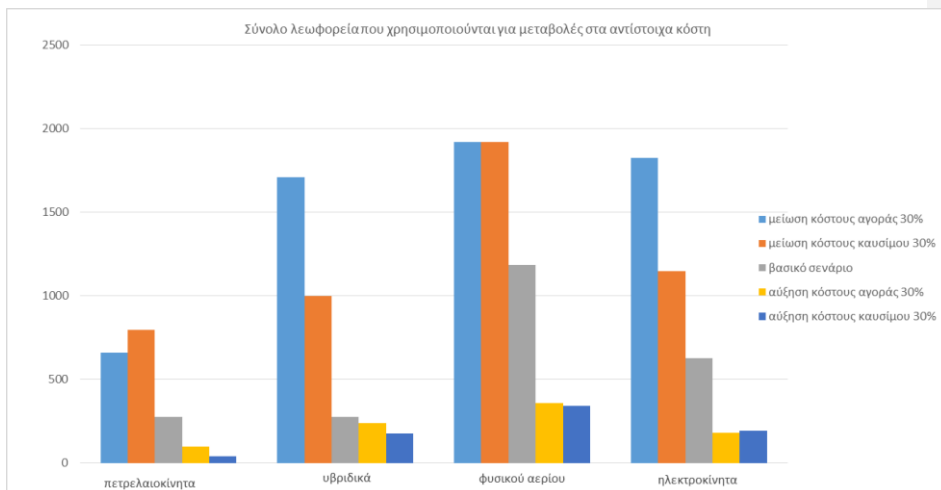
- Παρατηρείται ότι όσον αφορά τις μεταβολές στα αρχικά κόστη αγοράς των λεωφορείων δεν υπάρχει σημαντική μεταβολή της Αντικειμενικής Συνάρτησης με εξαίρεση τα σενάρια χαμηλού κόστους αγοράς λεωφορείων φυσικού αερίου, υβριδικών και ηλεκτροκίνητων. Πιο συγκεκριμένα, η μείωση κατά 30% του αρχικού κόστους αγοράς των λεωφορείων φυσικού αερίου, των υβριδικών και των ηλεκτροκίνητων επέφερε μείωση κατά 10,4%, 3,7% και 16,9% αντίστοιχα του τελικού κόστους διαχείρισης του στόλου στη διάρκεια του 20ετούς πλάνου. Οι σημαντικές αυτές μειώσεις οφείλονται στο γεγονός ότι οι εκάστοτε τύποι λεωφορείων που αγοράζονται φθηνότερα έχουν επιρροή στη διαμόρφωση του τελικού κόστους.
- Οι μεταβολές στις τιμές των καυσίμων εξίσου δεν είχαν μεγάλη επιρροή στην Αντικειμενική Συνάρτηση με εξαίρεση το σενάριο της μείωσης κατά 30% της τιμής του πετρελαίου και του φυσικού αερίου που οδήγησαν σε μείωση κατά 7% και 12% αντίστοιχα του τελικού κόστους διαχείρισης του στόλου.
- Να σημειωθεί επίσης ότι το σενάριο επιβολής προστίμου για την εκπομπή καυσαερίων διοξειδίου του άνθρακα αύξησε κατά 6% το τελικό κόστος διαχείρισης του στόλου. Αυτό συμβαίνει διότι όσα λεωφορεία χρησιμοποιούνται, τα οποία δεν είναι μόνο ηλεκτροκίνητα, επιβαρύνονται με το κόστος από την επιβολή του προστίμου.

- Η μείωση του προϋπολογισμού για την αγορά νέων λεωφορείων οδήγησε σε ελάχιστη αύξηση της τάξης του 1% του τελικού κόστους, γεγονός που δείχνει ότι τα χρήματα που διατίθενται για αγορές νέων λεωφορείων, πρώτον δεν είναι απαραίτητο να ξοδευτούν και δεύτερον δεν οδηγούν αναγκαστικά σε μείωση του τελικού κόστους.

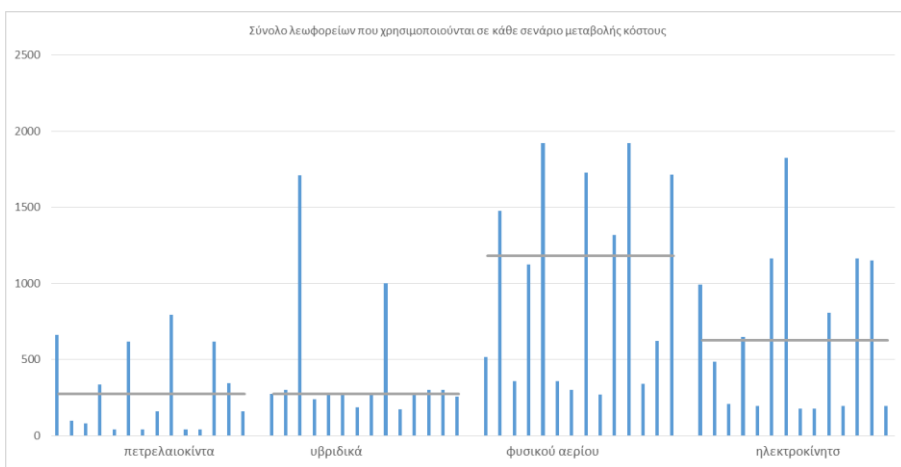
Στον δεύτερο πίνακα συμπεριλαμβάνονται και πάλι αριθμημένα σε μία στήλη τα 17 διαφορετικά σενάρια προβλημάτων που επιλύονται και σε μία σειρά ο συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου και η ποσοστιαία μεταβολή του με βάση το βασικό σενάριο.

**Πίνακας 5.28:** Συγκεντρωτικός πίνακας των 17 προβλημάτων βελτιστοποίησης με βάση το συνολικό αριθμό λεωφορείων που χρησιμοποιούνται

| Συγκριτικά στοιχεία                            | Λεωφορεία που χρησιμοποιούνται |              |                   |                   | Ποσοστιαία μεταβολή των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται από το βασικό σενάριο |              |                   |                   |
|--|--------------------------------|--------------|-------------------|-------------------|---|--------------|-------------------|-------------------|
|  | Πετρελαι<br>οκίνητα            | Υβρι<br>δικά | Φυσικού<br>Αερίου | Ηλεκτρο<br>κίνητα | Πετρελαιοκί<br>νητα   | Υβριδι<br>κά | Φυσικού<br>Αερίου | Ηλεκτροκί<br>νητα |
| 1. ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ                              | 276                            | 275          | 1183              | 627               |   |              |                   |                   |
| 2. Χαμηλό Κόστος Αγοράς Πετρελαιοκίνητων       | 660                            | 275          | 516               | 994               | 139%  | 0%           | -56%              | 59%               |
| 3. Υψηλό Κόστος Αγοράς Πετρελαιοκίνητων        | 100                            | 300          | 1477              | 485               | -64%  | 9%           | 25%               | -23%              |
| 4. Χαμηλό Κόστος Αγοράς Υβριδικών              | 80                             | 1710         | 360               | 210               | -71%  | 522%         | -70%              | -67%              |
| 5. Υψηλό Κόστος Αγοράς Υβριδικών               | 335                            | 240          | 1125              | 651               | 21%   | -13%         | -5%               | 4%                |
| 6. Χαμηλό Κόστος Αγοράς Λεωφορείων Φυσ. Αερίου | 40                             | 275          | 1920              | 195               | -86%  | 0%           | 62%               | -69%              |
| 7. Υψηλό Κόστος Αγοράς Λεωφορείων Φυσ. Αερίου  | 620                            | 285          | 360               | 1165              | 125%  | 4%           | -70%              | 86%               |
| 8. Χαμηλό Κόστος Αγοράς Ηλεκτροκίνητων         | 40                             | 185          | 300               | 1825              | -86%  | -33%         | -75%              | 191%              |
| 9. Υψηλό Κόστος Αγοράς Ηλεκτροκίνητων          | 160                            | 270          | 1728              | 180               | -42%  | -2%          | 46%               | -71%              |
| 10. Χαμηλό Κόστος Πετρελαίου                   | 796                            | 999          | 270               | 180               | 188%  | 263%         | -77%              | -71%              |
| 11. Υψηλό Κόστος Πετρελαίου                    | 40                             | 175          | 1319              | 806               | -86%  | -36%         | 11%               | 29%               |
| 12. Χαμηλό Κόστος Φυσ. Αερίου                  | 40                             | 275          | 1920              | 195               | -86%  | 0%           | 62%               | -69%              |
| 13. Υψηλό Κόστος Φυσ. Αερίου                   | 620                            | 300          | 340               | 1165              | 125%  | 9%           | -71%              | 86%               |
| 14. Χαμηλό Κόστος Ηλεκτρισμού                  | 344                            | 300          | 622               | 1149              | 25%   | 9%           | -47%              | 83%               |
| 15. Υψηλό Κόστος Ηλεκτρισμού                   | 160                            | 255          | 1715              | 195               | -42%  | -7%          | 45%               | -69%              |
| 16. Επιβολή προστίμου για εκπομπή καυσαερίων   | 205                            | 275          | 695               | 1185              | -26%  | 0%           | -41%              | 89%               |
| 17. Προϋπολογισμός 40.000.000                  | 354                            | 275          | 1175              | 551               | 28%   | 0%           | -1%               | -12%              |



**Σχήμα 5.43:** Σύνολο λεωφορείων που χρησιμοποιείται για μεταβολή στο αντίστοιχο κόστος με το οποίο σχετίζεται άμεσα



**Σχήμα 5.44:** Σύνολο λεωφορείων που χρησιμοποιούνται για κάθε σενάριο μεταβολής κόστους

Σε γενική ανάλυση του παραπάνω πίνακα και διαγράμματος τα στοιχεία που εξάγονται είναι τα εξής:

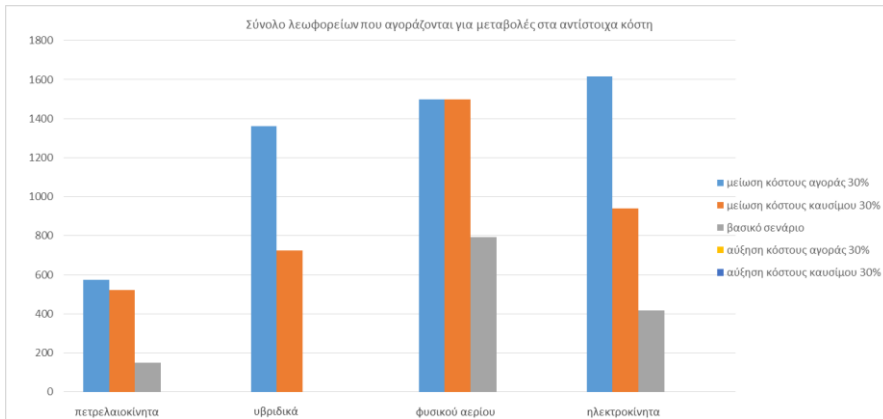
- Όλα τα σενάρια επηρεάζουν σημαντικά τον τελικό αριθμό των λεωφορείων του κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου. Όπως ήταν αναμενόμενο, στα σενάρια που μειώνεται το κόστος αγοράς κάποιου τύπου λεωφορείων, υπάρχει σημαντική αύξηση των λεωφορείων αυτών και το αντίστροφο συμβαίνει στα σενάρια αύξησης του κόστους αγοράς για τον κάθε τύπο λεωφορείων. Τη μεγαλύτερη αύξηση των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται κατά 522% σημειώνουν τα υβριδικά, γεγονός που δείχνει ότι μειονεκτούν στην παράμετρο τους κόστους αγοράς αλλά πλεονεκτούν στις υπόλοιπες παραμέτρους λειτουργίας και συντήρησης.
- Αντίστοιχα αποτελέσματα δίνουν και τα σενάρια μεταβολής της τιμής του καυσίμου. Μεγαλύτερη επιρροή έχει η μείωση του κόστους του πετρελαίου που αυξάνει κατά 188% και 263% τα πετρελαιοκίνητα και τα υβριδικά που χρησιμοποιούνται.
- Στο σενάριο επιβολής προστίμου για την εκπομπή καυσαερίων, υπήρξε σημαντική αύξηση 86% των χρησιμοποιούμενων ηλεκτροκίνητων, μείωση 26% των "ρυπογόνων" πετρελαιοκίνητων και 41% των λεωφορείων φυσικού αερίου.
- Η μείωση του προϋπολογισμού αγορών δεν είχε μεγάλη επιρροή στα χρησιμοποιούμενα λεωφορεία με εξαίρεση την αύξηση 26% των πετρελαιοκίνητων.

Στον τρίτο πίνακα συμπεριλαμβάνονται και πάλι αριθμημένα σε μία στήλη τα 17 διαφορετικά σενάρια προβλημάτων που επιλύονται και σε μία σειρά ο συνολικός αριθμός των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που αγοράζονται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου και η ποσοστιαία μεταβολή του με βάση το βασικό σενάριο.



**Πίνακας 5.29:** Συγκεντρωτικός πίνακας των 17 προβλημάτων βελτιστοποίησης με βάση το συνολικό αριθμό λεωφορείων που αγοράζονται

| Προβλήματα βελτιστοποίησης                     | Λεωφορεία που αγοράζονται |                 |          |                | Ποσοστιαία μεταβολή των λεωφορείων που αγοράζονται από το βασικό σενάριο |                 |          |                |               |
|--|---------------------------|-----------------|----------|----------------|--|-----------------|----------|----------------|---------------|
|  | Συγκριτικά στοιχεία       | Πετρελαιοκίνητα | Υβριδικά | Φυσικού Αερίου | Ηλεκτροκίνητα  | Πετρελαιοκίνητα | Υβριδικά | Φυσικού Αερίου | Ηλεκτροκίνητα |
| 1. ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ                              |                           | 151             | 0        | 793            | 417  |                 |          |                |               |
| 2. Χαμηλό Κόστος Αγοράς Πετρελαιοκίνητων       |                           | 574             | 0        | 126            | 784  | 280%            | x        | -84%           | 88%           |
| 3. Υψηλό Κόστος Αγοράς Πετρελαιοκίνητων        |                           | 0               | 0        | 1087           | 0  | -100%           | x        | 37%            | -34%          |
| 4. Χαμηλό Κόστος Αγοράς Υβριδικών              |                           | 0               | 1360     | 0              | 0  | -100%           | 1360     | -100%          | -100%         |
| 5. Υψηλό Κόστος Αγοράς Υβριδικών               |                           | 175             | 0        | 735            | 0  | 16%             | x        | -7%            | -100%         |
| 6. Χαμηλό Κόστος Αγοράς Λεωφορείων Φυσ. Αερίου |                           | 0               | 0        | 1500           | 0  | -100%           | x        | 89%            | -100%         |
| 7. Υψηλό Κόστος Αγοράς Λεωφορείων Φυσ. Αερίου  |                           | 475             | 0        | 0              | 955  | 215%            | x        | -100%          | 129%          |
| 8. Χαμηλό Κόστος Αγοράς Ηλεκτροκίνητων         |                           | 0               | 0        | 0              | 1615   | -100%           | x        | -100%          | 287%          |
| 9. Υψηλό Κόστος Αγοράς Ηλεκτροκίνητων          |                           | 0               | 0        | 1338           | 0  | -100%           | x        | 69%            | -100%         |
| 10. Χαμηλό Κόστος Πετρελαίου                   |                           | 521             | 724      | 0              | 0  | 245%            | 724      | -100%          | -100%         |
| 11. Υψηλό Κόστος Πετρελαίου                    |                           | 0               | 0        | 899            | 596  | -100%           | x        | 13%            | 43%           |
| 12. Χαμηλό Κόστος Φυσ. Αερίου                  |                           | 0               | 0        | 1500           | 0  | -100%           | x        | 89%            | -100%         |
| 13. Υψηλό Κόστος Φυσ. Αερίου                   |                           | 470             | 0        | 0              | 955  | 211%            | x        | -100%          | 129%          |
| 14. Χαμηλό Κόστος Ηλεκτρισμού                  |                           | 299             | 0        | 232            | 939  | 98%             | x        | -71%           | 125%          |
| 15. Υψηλό Κόστος Ηλεκτρισμού                   |                           | 0               | 0        | 1325           | 0  | -100%           | x        | 67%            | -100%         |
| 16. Επιβολή προστίμου για εκπομπή καυσαερίων   |                           | 165             | 0        | 335            | 975  | 9%              | x        | -58%           | 134%          |
| 17. Προϋπολογισμός 40.000.000                  |                           | 285             | 0        | 785            | 347  | 89%             | x        | -1%            | -17%          |



**Σχήμα 5.45:** Σύνολο λεωφορείων που αγοράζονται για μεταβολές στα αντίστοιχα κόστη με τα οποία σχετίζονται

Σε γενική ανάλυση του παραπάνω πίνακα τα στοιχεία που εξάγονται είναι τα εξής:

- Σε κάθε σενάριο που ευνοείται η αγορά κάποιου τύπου λεωφορείων, είτε με μείωση του αρχικού κόστους αγοράς τους είτε με μείωση του κόστους αγοράς καυσίμου, παρατηρείται σημαντική αύξηση των λεωφορείων που αγοράζονται του συγκεκριμένου τύπου. Μεγαλύτερη ευαισθησία παρατηρείται στα υβριδικά λεωφορεία, τα οποία δεν αγοράζονται σε αρκετά σενάρια με εξαίρεση προφανώς αυτά όπου μειώνεται κατά 30% το κόστος πετρελαίου και το κόστος αγοράς των υβριδικών, όπου αγοράζονται 1360 και 724 καινούργια υβριδικά αντίστοιχα.
- Αναμενόμενη ήταν επίσης η μείωση των αγορών του εκάστοτε τύπου λεωφορείων στα σενάρια όπου οι συνθήκες δεν ευνοούν τις αγορές τους. Στο 100% των σενάρια που υπάρχει αύξηση του κόστους αγοράς κάποιου τύπου λεωφορείων ή αύξηση του κόστους του καυσίμου που χρησιμοποιείται, αποφασίζεται να μην αγοραστεί κανένα λεωφορείο του συγκεκριμένου τύπου.
- Στο σενάριο με το χαμηλό προϋπολογισμό αγορών παρατηρείται αύξηση κατά 89% των αγορών πετρελαιοκίνητων, αφού είναι ο φθηνότερος τύπος λεωφορείων.

Στον τέταρτο πίνακα συμπεριλαμβάνονται και πάλι αριθμημένα σε μία στήλη τα 17 διαφορετικά σενάρια προβλημάτων που επιλύονται και σε μία σειρά ο μέσος όρος ηλικίας των διαφορετικών λεωφορείων κάθε τύπου που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του 20ετούς πλάνου και η ποσοστιαία μεταβολή του με βάση το βασικό σενάριο.

**Πίνακας 5.30:** Συγκεντρωτικός πίνακας των 17 προβλημάτων βελτιστοποίησης με βάση το μέσο όρο ηλικίας των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται

| Συγκριτικά στοιχεία                            | Μέσος όρος ηλικίας λεωφορείων |          |                |               | Ποσοστιαία μεταβολή μέσου όρου ηλικίας λεωφορείων από το βασικό σενάριο |          |                |               |
|--|-------------------------------|----------|----------------|---------------|---|----------|----------------|---------------|
|  | Πετρελαιοκίνητα               | Υβριδικά | Φυσικού Αερίου | Ηλεκτροκίνητα | Πετρελαιοκίνητα   | Υβριδικά | Φυσικού Αερίου | Ηλεκτροκίνητα |
| 1. ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ                              | 6,4                           | 10,2     | 7,0            | 7,8           |   |          |                |               |
| 2. Χαμηλό Κόστος Αγοράς Πετρελαιοκίνητων       | 3,9                           | 10,6     | 8,5            | 7,7           | -38%  | 4%       | 21%            | -2%           |
| 3. Υψηλό Κόστος Αγοράς Πετρελαιοκίνητων        | 10,3                          | 9,8      | 6,8            | 7,9           | 62%   | -4%      | -3%            | 1%            |
| 4. Χαμηλό Κόστος Αγοράς Υβριδικών              | 10,0                          | 6,9      | 9,3            | 9,7           | 57%   | -32%     | 33%            | 24%           |
| 5. Υψηλό Κόστος Αγοράς Υβριδικών               | 6,7                           | 10,6     | 7,1            | 7,8           | 6%  | 4%       | 1%             | 0%            |
| 6. Χαμηλό Κόστος Αγοράς Λεωφορείων Φυσ. Αερίου | 1,0                           | 10,5     | 6,9            | 10,2          | -84%  | 3%       | -2%            | 31%           |
| 7. Υψηλό Κόστος Αγοράς Λεωφορείων Φυσ. Αερίου  | 5,0                           | 10,2     | 10,2           | 7,4           | -21%  | 0%       | 46%            | -5%           |
| 8. Χαμηλό Κόστος Αγοράς Ηλεκτροκίνητων         | 1,0                           | 10,6     | 10,4           | 6,5           | -84%  | 4%       | 49%            | -17%          |
| 9. Υψηλό Κόστος Αγοράς Ηλεκτροκίνητων          | 10,3                          | 9,8      | 6,9            | 10,2          | 62%   | -4%      | -1%            | 30%           |
| 10. Χαμηλό Κόστος Πετρελαίου                   | 6,4                           | 7,6      | 10,2           | 9,5           | 0%  | -25%     | 45%            | 22%           |
| 11. Υψηλό Κόστος Πετρελαίου                    | 1,0                           | 10,6     | 6,4            | 7,7           | -84%  | 4%       | -9%            | -1%           |
| 12. Χαμηλό Κόστος Φυσ. Αερίου                  | 1,0                           | 10,6     | 6,8            | 10,2          | -84%  | 4%       | -3%            | 31%           |
| 13. Υψηλό Κόστος Φυσ. Αερίου                   | 5,1                           | 10,2     | 10,2           | 7,4           | -20%  | 1%       | 45%            | -5%           |
| 14. Χαμηλό Κόστος Ηλεκτρισμού                  | 2,8                           | 10,2     | 7,6            | 7,5           | -56%  | 0%       | 9%             | -4%           |
| 15. Υψηλό Κόστος Ηλεκτρισμού                   | 10,3                          | 10,1     | 6,9            | 9,6           | 62%   | -1%      | -1%            | 23%           |
| 16. Επιβολή προστίμου για εκπομπή καυσαερίων   | 2,1                           | 10,1     | 6,9            | 7,4           | -67%  | -0%      | -2%            | -5%           |
| 17. Προϋπολογισμός 40.000.000                  | 3,8                           | 10,4     | 7,0            | 8,0           | -40%  | 2%       | 0%             | 3%            |

Σε γενική ανάλυση του παραπάνω πίνακα τα στοιχεία που εξάγονται είναι τα εξής:

- Μείωση του αρχικού κόστους αγοράς του εκάστοτε τύπου λεωφορείων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του μέσου όρου ηλικίας του αντίστοιχου τύπου που χρησιμοποιείται, το οποίο προκύπτει κυρίως λόγω των αυξημένων αγορών του. Μεγαλύτερη ευαισθησία στη μείωση του μέσου όρου ηλικίας έχουν τα πετρελαιοκίνητα με ποσοστό 38%. Το ίδιο συμβαίνει και στην ενδεχόμενη αύξηση του κόστους αγοράς, το οποίο οδηγεί στην αύξηση του μ.ο. ηλικίας των λεωφορείων των οποίων αυξήθηκε το κόστος αγοράς. Μεγαλύτερη ευαισθησία δείχνουν πάλι τα πετρελαιοκίνητα όπου αυξάνεται ο μ.ο. ηλικίας τους κατά 62%.
- Η ενδεχόμενη αύξηση ή μείωση του κόστους αγοράς του καυσίμου που χρησιμοποιεί ο κάθε τύπος λεωφορείων, οδηγούν επίσης στην αύξηση ή μείωση του μέσου όρου ηλικίας των αντίστοιχων λεωφορείων. Μεγαλύτερη αύξηση του μ.ο. ηλικίας των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται σημειώνεται για τα φυσικού αερίου κατά 45% και η μεγαλύτερη μείωση για τα υβριδικά κατά 25%.

## Συμπεράσματα

### 6.1 Ανασκόπηση Διπλωματικής Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η επίτευξη της βέλτιστης κατανομής χρηματικών πόρων για την λειτουργία, αγορά και πώληση τεσσάρων διαφορετικών τύπων λεωφορείων που διαχειρίζεται ο Ο.Α.Σ.Α. για ένα πλάνο 20 ετών με στόχο την αποτελεσματικότερη λειτουργία του. Για το σκοπό αυτό προβλέπεται η ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης το οποίο στηρίζεται στις αρχές θεωρίας του γραμμικού προγραμματισμού.

Η συλλογή στοιχείων έγινε μέσω αντίστοιχων οργανισμών διαχείρισης στόλου λεωφορείων στην Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, αλλά και από άλλες σχετικές μελέτες.

Οι παράμετροι που εισάγονται στο μοντέλο είναι το κόστος συντήρησης, το κόστος αγοράς, το κόστος λειτουργίας, το κόστος εκπομπής καυσαερίων, το κέρδος από τις πωλήσεις, τα χιλιόμετρα που διανύονται.

Το μοντέλο επιλύεται μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης στην οποία εισάγονται οι παραπάνω συντελεστές και η οποία εκφράζει το τελικό κόστος που θα δαπανηθεί για τη λειτουργία του Ο.Α.Σ.Α. Στόχος μέσω της βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση της.

Περιοριστικοί παράγοντες είναι ο διαθέσιμος προϋπολογισμός για την αγορά νέων λεωφορείων ανά έτος, τα χιλιόμετρα που πρέπει να καλύπτονται ανά έτος, ο συνολικός αριθμός των λεωφορείων που πρέπει να υπάρχουν στη διάθεση του Ο.Α.Σ.Α. και περιορισμοί σχετικά με την ορθή χρήση των λεωφορείων όπως αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 4.5.2.

Συνολικά πραγματοποιούνται 17 σενάρια βελτιστοποίησης του τελικού κόστους για τη διαχείριση του στόλου λεωφορείων τα οποία διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το αρχικό κόστος αγοράς των λεωφορείων, ως προς το κόστος του καυσίμου, την ύπαρξη προστίμου από την εκπομπή καυσαερίων, το μέγεθος προϋπολογισμού αγορών νέων λεωφορείων. Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων δημιουργούνται πίνακες και

διαγράμματα που δείχνουν την ηλικία, τη χρονική στιγμή αλλά και τον αριθμό των λεωφορείων που αγοράζονται, πωλούνται και χρησιμοποιούνται, την τιμή της Αντικειμενικής Συνάρτησης και το μέσο όρο ηλικίας των χρησιμοποιηθέντων λεωφορείων για κάθε σενάριο ξεχωριστά.

Από τους πίνακες αυτούς σχηματίζεται συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων στον οποίο εισάγονται τα σημαντικότερα στοιχεία που προκύπτουν από την εφαρμογή των 17 διαφορετικών σεναρίων βελτιστοποίησης.

**Πίνακας Π1: Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων**

| Μοντέλα<br>βελτιστοποίησης                             | Τελικό Κόστος   | Λεωφορεία που<br>χρησιμοποιούνται |              |                |                       | Λεωφορεία που<br>πωλούνται      |                  |                    |                       | Λεωφορεία που<br>αγοράζονται    |              |                |                       | μ.ο. ηλικίας<br>λεωφορείων που<br>χρησιμοποιούνται |              |                    |                           |
|--|-----------------|-----------------------------------|--------------|----------------|-----------------------|---------------------------------|------------------|--------------------|-----------------------|---------------------------------|--------------|----------------|-----------------------|--|--------------|--------------------|---------------------------|
|  |                 | πετ<br>ελαι<br>οκίνη<br>τα        | υβρι<br>δικά | φυσ.α<br>ερίου | ηλεκτ<br>ροκίν<br>ητα | πετ<br>ρελ<br>αιοκ<br>ίνητ<br>α | υβ<br>ριδ<br>ικά | φυσ.<br>αερί<br>ου | ηλεκτ<br>ροκίν<br>ητα | πετ<br>ρελ<br>αιοκ<br>ίνητ<br>α | υβρι<br>δικά | φυσ.α<br>ερίου | ηλεκτ<br>ροκίν<br>ητα | πετρε<br>λαοκί<br>νητα                             | υβρι<br>δικά | φυσ.<br>αερί<br>ου | ηλεκ<br>τροκ<br>ίνητ<br>α |
| 1. ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ                                      | 1.006.657.050 € | 276                               | 275          | 1183           | 627                   | 600                             | 375              | 660                | 376                   | 151                             | 0            | 793            | 417                   | 6,4  | 10,2         | 7,0                | 7,8                       |
| 2. Χαμηλό Κόστος<br>Αγοράς<br>Πετρελαιοκίνητων         | 1.002.843.197 € | 660                               | 275          | 516            | 994                   | 670                             | 375              | 450                | 639                   | 574                             | 0            | 126            | 784                   | 3,9  | 10,6         | 8,5                | 7,7                       |
| 3. Υψηλό Κόστος<br>Αγοράς<br>Πετρελαιοκίνητων          | 992.165.137 €   | 100                               | 300          | 1477           | 485                   | 600                             | 375              | 731                | 306                   | 0                               | 0            | 1087           | 275                   | 10,3   | 9,8          | 6,8                | 7,9                       |
| 4. Χαμηλό Κόστος<br>Αγοράς Υβριδικών                   | 969.529.060 €   | 80                                | 1710         | 360            | 210                   | 600                             | 735              | 450                | 225                   | 0                               | 1360         | 0              | 0                     | 10,0   | 6,9          | 9,3                | 9,7                       |
| 5. Υψηλό Κόστος<br>Αγοράς Υβριδικών                    | 995.032.079 €   | 335                               | 240          | 1125           | 651                   | 600                             | 375              | 626                | 400                   | 175                             | 0            | 735            | 441                   | 6,7  | 10,6         | 7,1                | 7,8                       |
| 6. Χαμηλό Κόστος<br>Αγοράς<br>Λεωφορείων<br>Φυσ.Αερίου | 901.977.478 €   | 40                                | 275          | 1920           | 195                   | 600                             | 375              | 950                | 225                   | 0                               | 0            | 1500           | 0                     | 1,0  | 10,5         | 6,9                | 10,2                      |
| 7. Υψηλό Κόστος<br>Αγοράς<br>Λεωφορείων<br>Φυσ.Αερίου  | 1.002.544.152 € | 620                               | 285          | 360            | 1165                  | 675                             | 375              | 450                | 580                   | 475                             | 0            | 0              | 955                   | 5,0  | 10,2         | 10,2               | 7,4                       |
| 8. Χαμηλό Κόστος<br>Αγοράς<br>Ηλεκτροκίνητων           | 836.810.091 €   | 40                                | 185          | 300            | 1825                  | 600                             | 375              | 450                | 840                   | 0                               | 0            | 0              | 1615                  | 1,0  | 10,6         | 10,4               | 6,5                       |
| 9. Υψηλό Κόστος<br>Αγοράς<br>Ηλεκτροκίνητων            | 1.002.526.047 € | 160                               | 270          | 1728           | 180                   | 600                             | 375              | 788                | 225                   | 0                               | 0            | 1338           | 0                     | 10,3   | 9,8          | 6,9                | 10,2                      |
| 10. Χαμηλό Κόστος<br>Πετρελαίου                        | 936.869.655 €   | 796                               | 999          | 270            | 180                   | 815                             | 405              | 450                | 225                   | 521                             | 724          | 0              | 0                     | 6,4  | 7,6          | 10,2               | 9,5                       |
| 11. Υψηλό Κόστος<br>Πετρελαίου                         | 1.021.361.078 € | 40                                | 175          | 1319           | 806                   | 600                             | 375              | 680                | 490                   | 0                               | 0            | 899            | 596                   | 1,0  | 10,6         | 6,4                | 7,7                       |
| 12. Χαμηλό Κόστος<br>Φυσ.Αερίου                        | 888.116.767 €   | 40                                | 275          | 1920           | 195                   | 600                             | 375              | 950                | 225                   | 0                               | 0            | 1500           | 0                     | 1,0  | 10,6         | 6,8                | 10,2                      |
| 13. Υψηλό Κόστος<br>Φυσ.Αερίου                         | 1.028.050.994 € | 620                               | 300          | 340            | 1165                  | 670                             | 375              | 450                | 580                   | 470                             | 0            | 0              | 955                   | 5,1  | 10,2         | 10,2               | 7,4                       |
| 14. Χαμηλό Κόστος<br>Ηλεκτρισμού                       | 966.341.356 €   | 344                               | 300          | 622            | 1149                  | 600                             | 375              | 566                | 579                   | 299                             | 0            | 232            | 939                   | 2,8  | 10,2         | 7,6                | 7,5                       |
| 15. Υψηλό Κόστος<br>Ηλεκτρισμού                        | 1.013.174.212 € | 160                               | 255          | 1715           | 195                   | 600                             | 375              | 775                | 225                   | 0                               | 0            | 1325           | 0                     | 10,3   | 10,1         | 6,9                | 9,6                       |
| 16. Επιβολή<br>προστίμου για<br>εκπομπή<br>καυσαερίων  | 1.065.241.958 € | 205                               | 275          | 695            | 1185                  | 600                             | 375              | 565                | 585                   | 165                             | 0            | 335            | 975                   | 2,1  | 10,1         | 6,9                | 7,4                       |
| 17.<br>Προϋπολογισμός<br>40.000.000                    | 1.020.465.780 € | 354                               | 275          | 1175           | 551                   | 600                             | 375              | 520                | 572                   | 285                             | 0            | 785            | 347                   | 3,8  | 10,4         | 7,0                | 8,0                       |

## 6.2 Συμπεράσμα

Τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων είναι τα εξής:

- Η **αύξηση του κόστους αγοράς** του εκάστοτε τύπου λεωφορείων έχει ως αποτέλεσμα τη **μείωση της χρήσης** του συγκεκριμένου τύπου. Περισσότερο από την αύξηση του κόστους αγοράς τους κατά 30% επηρεάζονται τα πετρελαιοκίνητα, τα φυσικού αερίου και τα ηλεκτροκίνητα, για τα οποία υπάρχει μείωση κατά 70% στην κάθε περίπτωση. Αντίστοιχα, η **μείωση του κόστους αγοράς** του εκάστοτε τύπου λεωφορείων έχει ως αποτέλεσμα την **αύξηση των λεωφορείων** του συγκεκριμένου τύπου που **χρησιμοποιούνται**. Σημαντικότερη, σε ενδεχόμενη μείωση του κόστους αγοράς τους κατά 30%, είναι η αύξηση των υβριδικών κατά 522% και των ηλεκτροκίνητων κατά 191%.
- Η **αύξηση του κόστους** του κάθε **καυσίμου** επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την "απόφαση" του μοντέλου για **μειωμένη χρήση** των λεωφορείων που χρησιμοποιούν το συγκεκριμένο καύσιμο. Σημαντικότερη μείωση έχουν τα πετρελαιοκίνητα κατά 90%, τα ηλεκτροκίνητα και φυσικού αερίου κατά 70%. Ομοίως, η **μείωση του κόστους** του κάθε **καυσίμου** οδηγεί σε **αύξηση των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται** και λειτουργούν με το συγκεκριμένο καύσιμο. Περισσότερο επηρεάζονται τα πετρελαιοκίνητα και τα υβριδικά καθώς αυξάνονται κατά 188% και 263% αντίστοιχα, σε περίπτωση που το κόστος του πετρελαίου μειωθεί κατά 30%.
- Στο 100% των μοντέλων βελτιστοποίησης που επιλύθηκαν για **αύξηση του κόστους αγοράς** του εκάστοτε τύπου λεωφορείων ή **αύξηση του κόστους καυσίμου** που χρησιμοποιούν έχει ως αποτέλεσμα τη **μηδενική αγορά** του συγκεκριμένου τύπου. Αντίθετα, η **μείωση του κόστους αγοράς** του εκάστοτε τύπου λεωφορείων ή του καυσίμου που χρησιμοποιούν έχει ως αποτέλεσμα την **αύξηση των λεωφορείων** του συγκεκριμένου τύπου που **αγοράζονται**. Σημαντικότερη, σε ενδεχόμενη μείωση του κόστους αγοράς τους κατά 30% ή του πετρελαίου κατά 30%, είναι η αύξηση των υβριδικών που αγοράζονται κατά 1360 και 724 περισσότερα οχήματα αντίστοιχα.



- Σε όλες τις περιπτώσεις που **ευνοείται η αγορά κάποιου τύπου λεωφορείων**, είτε με τη μείωση του αρχικού κόστους αγοράς τους είτε με τη μείωση του κόστους καυσίμου που χρησιμοποιούν, οδηγεί σε **μικρή αύξηση του ποσοστού των πωλήσεων** του συγκεκριμένου τύπου. Αυτή η ενέργεια δικαιολογείται καθώς είναι προτιμότερη η συνεχόμενη αγορά νέων λεωφορείων από τη συνεχόμενη χρήση τους.
- Η μικρή ηλικία των λεωφορείων αποτελεί σημαντικό κομμάτι της διοίκησης του Ο.Α.Σ.Α. για τη δημιουργία φιλικότερης εικόνας προς τον χρήστη αλλά και για τον ίδιο τον οργανισμό. Η **μείωση του κόστους αγοράς** του εκάστοτε τύπου λεωφορείων έχει ως αποτέλεσμα τη **μείωση του μέσου όρου ηλικίας** των λεωφορείων που χρησιμοποιούνται του συγκεκριμένου τύπου. Αιτία του παραπάνω είναι η συνεχόμενη ανανέωση των λεωφορείων με την αγορά καινούργιων. Περισσότερο από την αύξηση του κόστους αγοράς τους κατά 30% επηρεάζονται τα πετρελαιοκίνητα και τα λεωφορεία φυσικού αερίου, για τα οποία υπάρχει μείωση του μέσου όρου ηλικίας τους κατά 40% και 30% αντίστοιχα. Αντίθετα, η **αύξηση του κόστους αγοράς** του εκάστοτε τύπου λεωφορείων έχει ως αποτέλεσμα την **αύξηση του μέσου όρου ηλικίας** του συγκεκριμένου τύπου που **χρησιμοποιούνται**. Αυτό συμβαίνει διότι αποφεύγεται η αγορά νέων λεωφορείων με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται εκείνα που βρίσκονται στον αρχικό στόλο για αρκετά χρόνια μέχρι τη στιγμή της πώλησής τους. Σημαντικότερη, σε ενδεχόμενη αύξηση του κόστους αγοράς τους κατά 30%, είναι η αύξηση του μέσου όρου ηλικίας κατά 622% των πετρελαιοκίνητων.
- Η **μείωση στον προϋπολογισμό** που διατίθεται στον Ο.Α.Σ.Α. για αγορές επηρεάζει ελάχιστα όχι μόνο τα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται αλλά και το τελικό κόστος για τη διαχείριση του στόλου. Πραγματοποιείται **μικρή αύξηση των πετρελαιοκίνητων που αγοράζονται**, τα οποία αποτελούν το φθηνότερο τύπο λεωφορείων, καθώς μειώνεται η αγορά των ακριβότερων ηλεκτροκίνητων.
- Ενδεχόμενη **επιβολή προστίμου για την εκπομπή καυσαερίων** διοξειδίου του άνθρακα από τα οχήματα επιφέρει σημαντική **μείωση στα ρυπογόνα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται** (πετρελαιοκίνητα και φυσικού αερίου) και στο μέσο όρο ηλικίας όσων χρησιμοποιούνται. Ενώ, παράλληλα **αυξάνεται το τελικό κόστος διαχείρισης** του στόλου λεωφορείων καθώς ακόμα χρησιμοποιούνται λεωφορεία που εκπέμπουν ρύπους, αλλά με την προσαύξηση του προστίμου.
- Το **τελικό κόστος** για τη διαχείριση του στόλου λεωφορείων **μειώνεται** σημαντικά στις περιπτώσεις που **ευνοείται η αγορά συγκεκριμένου τύπου λεωφορείων**. Αυτό εξηγείται καθώς γίνεται χρήση κυρίως των λεωφορείων που αγοράζονται αρκετά φθηνά, με συνέπεια να προκύπτει μικρό τελικό κόστος αγοράς. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα μείωσης του κόστους αγοράς των ηλεκτροκίνητων, τα οποία αποτελούν το 80% του στόλου) κατά 30% που οδηγεί σε μείωση κατά 17% του τελικού κόστους διαχείρισης. Αντίθετα, το **τελικό κόστος μεταβάλλεται ελάχιστα**, είτε αυξητικά είτε

μειωτικά, όταν **αυξάνεται το κόστος αγοράς** ενός τύπου λεωφορείου ή του καυσίμου που χρησιμοποιεί. Αυτό συμβαίνει διότι παρά το γεγονός ότι δεν ευνοείται η αγορά ενός τύπου λεωφορείων, μπορούν τα καλυφθούν οι ανάγκες του Ο.Α.Σ.Α. από τους υπόλοιπους τύπους λεωφορείων.

- Τα **υβριδικά λεωφορεία** σημειώνουν σημαντικά θετικές μεταβολές μόνο στις περιπτώσεις που ευνοείται η αγορά τους. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι μειονέκτημα των υβριδικών αποτελεί το αρχικό κόστος αγοράς τους και πλεονεκτούν στα υπόλοιπα χαρακτηριστικά που αφορούν στο κόστος λειτουργίας και συντήρησης, ενώ δεν επηρεάζονται από τις μεταβολές στα κόστη που αφορούν στους υπόλοιπους τύπους λεωφορείων.
- Στο σύνολο των μοντέλων που επιλύθηκαν για διαφορετικά κόστη αγορών και καυσίμων τα λεωφορεία που χρησιμοποιούνται είναι 43% φυσικού αερίου, 28% ηλεκτροκίνητα, 17% υβριδικά και 12% πετρελαιοκίνητα, επιδεικνύοντας με αυτό τον τρόπο τα λεωφορεία που προτιμώνται περισσότερο.
- Οι μεταβολές των τιμών που δείχνουν να αφορούν έναν συγκεκριμένο τύπο οχημάτων (π.χ. η μείωση του κόστους ηλεκτρισμού αφορά τα ηλεκτροκίνητα) επηρεάζουν άμεσα και τις ενέργειες που γίνονται για τους υπόλοιπους τύπους οχημάτων. Αυτό συμβαίνει καθώς υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των χρονικών στιγμών και των ενεργειών που πρέπει να πραγματοποιηθούν για την αποτελεσματικότερη και οικονομικότερη λειτουργία του στόλου λεωφορείων που διαχειρίζεται Ο.Α.Σ.Α.

### 6.3 Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Για την περαιτέρω μελέτη του αντικειμένου της παρούσας διπλωματικής εργασίας ενδιαφέρον θα παρουσίαζαν τα παρακάτω:

- Για την ανάπτυξη του μοντέλου βελτιστοποίησης γίνονται οι υποθέσεις ότι το κόστος συντήρησης των λεωφορείων, η αποδοτικότητα του κινητήρα και τα χιλιόμετρα που διναούν μειώνονται γραμμικά με την ηλικία τους. Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε μία διαφορετική προσέγγιση στην οποία τα παρέμεναν σταθερές αυτές οι τιμές για κάθε τύπο λεωφορείου.
- Στην παρούσα διπλωματική εργασία η τιμή των καυσίμων δεν μεταβάλλεται με το χρόνο, όπως δε λαμβάνεται υπόψη και ο πληθωρισμός. Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε μία προσέγγιση όπου θα περιλαμβανόταν και η μεταβολή του κόστους του κάθε καυσίμου

με το χρόνο καθώς η συμβολή τους στις ενέργειες που γίνονται για τη διαχείριση του στόλου είναι αρκετά σημαντική.

- Ο στόλος λεωφορείων που διαχειρίζεται ο Ο.Α.Σ.Α. είναι ανομοιογενής καθώς έχει στη διάθεση του τους τέσσερις διαφορετικούς τύπους λεωφορείων με βάση τους οποίους έγινε η ανάλυση του μοντέλου βελτιστοποίησης της διπλωματικής εργασίας. Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η μελέτη ενός ομοιογενούς στόλου λεωφορείων ενός συγκεκριμένου τύπου και η σύγκριση του με τον ίδιο μεγέθους στόλο που περιλαμβάνει διαφορετικό τύπο λεωφορείων.
- Καθώς νέοι τύποι κινητήρων αναπτύσσονται συνεχώς, χρησιμοποιούνται νέοι τύποι λεωφορείων, όπως για παράδειγμα τα ηλεκτροκίνητα με τη χρήση μόνο μπαταρίας και τα λεωφορεία που λειτουργούν κυψέλες υδρογόνου. Θα μπορούσε να γίνει μια μελέτη για την ανάδειξη αυτών των νέων τύπων λεωφορείων και κατά πόσο μπορούν να ενσωματωθούν στη λειτουργία των αστικών συγκοινωνιών.
- Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε, η μοναδική πηγή κέρδους για τον Ο.Α.Σ.Α. προκύπτει από την πώληση των χρησιμοποιημένων λεωφορείων. Θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί έρευνα η οποία θα συμπεριλαμβάνει στην συνάρτηση υπολογισμού κόστους, τα κέρδη που προκύπτουν από άλλες παραμέτρους όπως η καταβολή κομίστρου.

## Βιβλιογραφία

---

- Wayne, S. W., Sandoval, J. A., and Clark, N. N. Emissions Benefits from Alternative Fuels and Advanced Technology in the U.S. Transit Bus Fleet. *Energy and Environment*, Vol. 20, No. 4, 2009
- Karabakal, N., Lohmann, J. R., and Bean, J. C. Parallel Replacement under Capital Rationing Constraints. *Management Science*, 1994
- Figliozzi, M.A, Boudart, J., and Feng, W., Economic and Environmental Optimization of Vehicle Fleets: A Case Study of the Impacts of Policy, Market, Utilization, and Technological Factors, 2011
- Samaras, C. and Meisterling, K. Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Plug-In Hybrid Vehicles: Implications for Policy. *Environment Science Technology*, Vol. 42, 2008
- EPA (2011) Emission Facts: Average Carbon Dioxide Emissions Resulting from Gasoline and Diesel Fuel. Updated April 12th, 2011
- FONTARAS, G., PISTIKOPOULOS, P., & SAMARAS, Z. Experimental Evaluation of Hybrid Vehicle Fuel Economy and Pollutant Emissions Over Real-world Simulation Driving Cycles. *Atmospheric Environment*, Vol. 42, 2008
- HARTMAN, J. C. The Parallel Replacement Problem with Demand and Capital Budgeting Constraints. *Naval Research Logistics*, 2000
- KELES, P. & HARTMAN, J. C. Case Study: Bus Fleet Replacement, 2004
- MISHRA, S., MATHEW T. V., KHASNABIS S. Single-Stage Integer Programming Model for Long-Term Transit Fleet Resource Allocation, 2010
- EILON, S., J. R. KING, AND D. E HUTCHINSON A Study in Equipment Replacement; *Operational Research Society*, 1966
- BETHUYNE, G. Optimal replacement under variable intensity of utilization and technological progress. *The Engineering Economist*, 1998
- BRIDGEMAN, M. S., SVEINSSON, H., AND KING, R. D. Economic comparison of new buses versus rehabilitated buses, 1983
- BUDDHAKULSOMSIRI, J. AND P. PARTHANADEE Parallel Replacement Problem for a Fleet with Dependent Use. ,2006

- CLARK N. N., ZHEN. F., et al., Assessment of Hybrid-Electric Transit Bus Technology. Transit Cooperative Research Program. Federal Transit Administration, 2009
- CHANDLER, K. & WALKOWICZ, K. King County Metro Transit Hybrid Articulated Buses: Final Evaluation Results. National Renewable Energy Laboratory, 2006
- HAO, Y., YU, L., SONG, G., XU, Y., WANG, HONGTU, X. Analysis of Driving Behavior and Emission Characteristics for Diesel Transit Buses using PEMS' Measurements, 2010
- KHASNBIS, S. M., ALSAIDI E., ELLIS R. D., Optimal Allocation of Resources to Meet Transit Fleet Requirements, 2002
- REDMER, A. Vehicle Replacement Planning in Freight Transportation Companies, 2005
- Μ.Γ. ΚΑΡΛΑΥΤΗΣ, Κ.Π. ΛΥΜΠΕΡΗΣ , Συστήματα Αστικών Συγκοινωνιών, Εκδόσεις Συμμετρία, 2009
- ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ Γ.Σ., ΓΕΩΡΓΙΟΥ Α.Κ., Ποσοτική Ανάλυση για τη Λήψη Διοικητικών Αποφάσεων, Εκδόσεις Ευγ. Μπένου, Αθήνα 1999
- ΠΡΑΣΤΑΚΟΣ Γ., Διοικητική Επιστήμη: Λήψη Επιχειρηματικών Αποφάσεων στην Κοινωνία της Πληροφορίας, Εκδόσεις Αθαν. Σταμούλης, Αθήνα 2000

#### Δικτυακοί τόποι

- Πανελλήνια Ομοσπονδία Πρατηριούχων Εμπόρων Καυσίμων [www.popek.gr](http://www.popek.gr)
- Ελληνική Στατιστική Αρχή [www.eurostat.com](http://www.eurostat.com)
- Γραφείο Τεχνικών Στατιστικών , Bureau of Labor Statistics [www.lbs.gov](http://www.lbs.gov)
- Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Περιβάλλοντος [www.eea.europa.eu](http://www.eea.europa.eu)
- Science direct , [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [www.trid.com](http://www.trid.com)
- [www.economics.gr](http://www.economics.gr)