



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

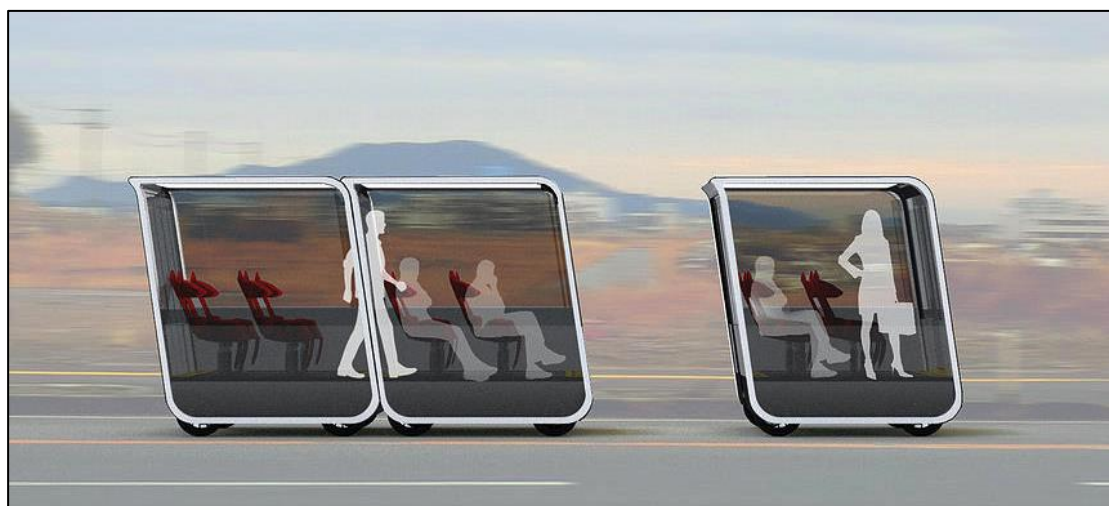
**ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ – ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**« ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ
ΜΕ ΣΤΟΛΟ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΑΡΘΡΩΤΩΝ ΛΕΩΦΟΡΕΙΩΝ
(MODULAR BUSES) »**



Δήμητρα-Παρασκευή Ζερμασλή

Επιβλέπων Καθηγητής: Κωνσταντίνος Κεπαπτσόγλου

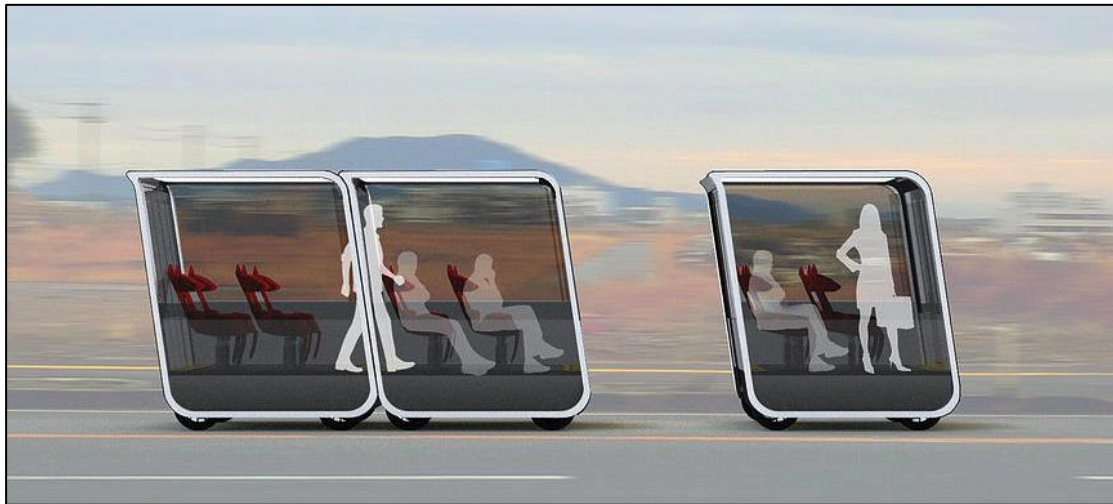
Αθήνα, Οκτώβριος 2021



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF RURAL, SURVEYING AND GEOINFORMATICS
DEPARTMENT OF INFRASTRUCTURE WORKS AND RURAL PLANNING
LABORATORY OF TRANSPORTATION

DIPLOMA THESIS

« OPTIMAL DESIGN OF FEEDER BUS NETWORK WITH
MODULAR BUSES »



Dimitra-Paraskevi Zermasli

Supervisor Professor: Konstantinos Kepaptsoglou

Athens, October 2021

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την περάτωση της διπλωματικής εργασίας, ολοκληρώνεται ένας πενταετής κύκλος σπουδών στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών-Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Κατά τη διάρκεια των σπουδών μου συνεργάστηκα με εξαιρετικούς καθηγητές και συμφοιτητές που με στήριξαν και με βοήθησαν σε όλη μου την πορεία, τους οποίους οφείλω να ευχαριστήσω.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, τον Κύριο και Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ Κωνσταντίνο Κεραπτσόγλου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε εξ' αρχής, αναθέτοντας μου το συγκεκριμένο θέμα, για την επιστημονική του καθοδήγηση, για τη συνεχή υποστήριξη και συμπαράσταση του, καθώς και για το αμείωτο ενδιαφέρον του από την αρχή μέχρι το τέλος.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Μετα-Διδάκτορα της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ Χριστίνα Ηλιοπούλου για την προθυμία της, την καθοριστική βοήθεια που μου προσέφερε και για τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε σε όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους μου και ιδιαίτερα το φίλο μου Κωνσταντίνο. Η βοήθεια και η συμπαράστασή τους σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου και στη διπλωματική μου εργασία ήταν ανεκτίμητη.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, που είναι στο πλευρό μου σε κάθε μου στόχο, σε κάθε μου στιγμή, στους οποίους οφείλω και όλη μου τη διαδρομή μέχρι σήμερα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί ο βέλτιστος σχεδιασμός δικτύου τροφοδοτικών γραμμών, με στόλο αυτόνομων αρθρωτών λεωφορείων (“modular buses”), με στόχο την αποτελεσματική εξυπηρέτηση της ζήτησης από πολλαπλές προελεύσεις σε πολλαπλούς προορισμούς. Πρόκειται για ένα εξειδικευμένο και σύνθετο πρόβλημα, το οποίο υπάγεται στην ευρύτερη κατηγορία προβλημάτων σχεδιασμού αστικών συγκοινωνιών. Το πρότυπο που δημιουργείται, ακολουθεί τη μορφή ενός προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων “Πολλά προς πολλά”, ενώ το μοντέλο διαμορφώνεται βάσει της μεθοδολογίας που εφαρμόζεται στα συστήματα κατηγορίας “Ανταποκρινόμενα στη ζήτηση μεταφορά”. Ο στόλος οχημάτων, αποτελείται από ομοιογενή αρθρωτά αυτόνομα οχήματα συγκεκριμένης χωρητικότητας. Με τη σύνδεση των οχημάτων αυτών, πραγματοποιείται η μετάβαση μετακινούμενων σε άλλο όχημα κατά τη διάρκεια του ταξιδιού (“En-route transfer”). Για την επίλυση του μοντέλου, εφαρμόζεται ένας γενετικός αλγόριθμος μέσω του οποίου παράγονται οι διαδρομές που ικανοποιούν τη ζήτηση, ενώ μέσω κατάλληλων περιορισμών, εντοπίζονται οι διαδρομές που πρόκειται να συνδεθούν για να εξυπηρετήσουν τους μετακινούμενους με τη νέα αυτή τεχνολογία. Ο αλγόριθμος που εφαρμόζεται αποδείχθηκε ότι παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα σε μικρό υπολογιστικό χρόνο.

Λέξεις Κλειδιά: Σχεδιασμός τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείων, Σχεδιασμός αστικών συγκοινωνιών, Αρθρωτά αυτόνομα λεωφορεία, Ανταποκρινόμενη στη ζήτηση μεταφορά, Γενετικός αλγόριθμος, Διαδρομές λεωφορείων, Βελτιστοποίηση

ABSTRACT

The subject of this present diploma thesis is the optimization of “Feeder bus network design problem” by modular buses, with the aim to effectively satisfy the transportation demands from various departure points to a number of different destinations. This constitutes a very specific and complex issue, which falls under the broad category of issues relating to “Transit Route Network Design Problems”. The model created follows the form of routing of vehicles called “Many to many” and it is structured on the basis of the methodology applied to the category systems called “Demand Responsive Transit”. The fleet of vehicles is comprised of modular vehicles of specific capacity. The en-route transfer takes place when the vehicles are connected with each other. In order for the said model to be resolved, a genetic algorithm is applied through which the routes which satisfy the demands are created and, subsequently, through the application of appropriate constraints, the routes which are to be connected for the benefit of the passengers are identified through the application of these new technologies. The algorithm’s application showed that reliable results can be produced in relatively-a short computational time.

Keywords: Feeder-Bus network design problem, Transit route network design problem
Modular buses, Demand responsive transit, Genetic algorithm, Routing, Optimization

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	11
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	11
ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1.1. Εισαγωγή	13
1.2. Αντικείμενο και στόχος διπλωματικής εργασίας.....	14
1.3. Δομή κεφαλαίων.....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	17
2.1. Εισαγωγή	17
2.2. Σχεδιασμός δικτύου τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείων	17
2.2.1. Ορισμός του προβλήματος	17
2.2.2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	20
2.3. Ανταποκρινόμενη στη ζήτηση μεταφορά	23
2.3.1. Ορισμός προβλήματος	23
2.3.2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	24
2.4. Αυτόνομα αρθρωτά ηλεκτρικά λεωφορεία	25
2.4.1. Ορισμός προβλήματος	25
2.4.2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	32
3.1. Εισαγωγή	32
3.2. Περιγραφή του προβλήματος.....	32
3.3. Μαθηματικό μοντέλο.....	34
3.3.1. Αντικειμενική συνάρτηση.....	37
3.3.2. Περιορισμοί.....	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ	39
4.1. Εισαγωγή	39
4.2. Βασικές έννοιες γενετικού αλγορίθμου	39
4.3. Δομή γενετικού αλγορίθμου	40
4.4. Πλεονεκτήματα των γενετικών αλγορίθμων.....	47
4.5. Εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου στο μοντέλο.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ	53
5.1 Εισαγωγή	53
5.2. Περιοχή μελέτης και δεδομένα	53
5.3. Αποτελέσματα αλγορίθμου	60
5.3.1. Εισαγωγή.....	60

5.3.2. Περιβάλλον της “Visual Basic” / ”Visual Basic for Applications”	60
5.3.3. Υλοποίηση του μοντέλου στη “VBA”	61
5.4. Βελτιστοποίηση	63
5.4.1. Εισαγωγή.....	63
5.4.2. Λογισμικό “Evolver”	63
5.4.3. Παράμετροι και αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου.....	64
5.4.4. Επιλογή βέλτιστης λύσης	68
5.5. Ανάλυση ευαισθησίας.....	77
5.5.1. Ανοχή του χρόνου.....	77
5.5.2. Χωρητικότητα αρθρωτών αυτόνομων ηλεκτρικών λεωφορείων.....	79
5.5.3. Ζήτηση	81
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	84
6.1. Εισαγωγή	84
6.2. Σύνοψη μελέτης διπλωματικής εργασίας.....	84
6.3. Συμπεράσματα.....	86
6.4. Προτάσεις για περαιτέρω ανάπτυξη της έρευνας.....	87
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	90
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	93
Κώδικας Visual Basic.....	93

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Πρόβλημα σχεδιασμού τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείων (Πηγή: Kuan sze nee, 2003)	18
Εικόνα 2: Πρόβλημα του σχεδιασμού τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείων “Many-to-one”. (Πηγή: The Feeder-bus Network-design Problem, G.K. Kuah, J. Perl 1989)	19
Εικόνα 3: Πρόβλημα του σχεδιασμού τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείων “Many-to-many” (Πηγή: The Feeder-bus Network-design Problem, G.K. Kuah, J. Perl 1989)	19
Εικόνα 4: Αρθρωτά αυτόνομα ηλεκτρικά λεωφορεία.(Πηγή: https://www.next-future-mobility.com/)	27
Εικόνα 5: Αλλαγή οχήματος κατά τη διάρκεια του ταξιδιού “En-route transfer”. (Πηγή: https://www.next-future-mobility.com/)	32
Εικόνα 6: Μέθοδος ποσοστιαίας επιλογής- “τροχός της τύχης” (Πηγή: Γενετικός αλγόριθμος στο πρόβλημα επιλογής μεταβλητών, Μπαλτζογλου Δ.Ελένη,2020)	43
Εικόνα 7: Διασταύρωση ενός σημείου (Πηγή: https://www.tutorialspoint.com/genetic_algorithms/genetic_algorithms_crossover.htm)	44
Εικόνα 8: Διασταύρωση πολλαπλών σημείων (Πηγή: https://www.tutorialspoint.com/genetic_algorithms/genetic_algorithms_crossover.htm)	45
Εικόνα 9: Δομή γενετικού αλγορίθμου (Πηγή: https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/3446/1/Chapter_3.pdf)	46
Εικόνα 10.Περιοχή μελέτης.....	54
Εικόνα 11: Συνδυασμός 25,0.6,0.25, εγκλωβισμός σε τοπικό ελάχιστο	65
Εικόνα 12.Επιτρεπόμενες διαδρομές με αλλαγή για την εξυπηρέτηση ζήτησης του σταθμού μετρό της Δάφνης και του Αγίου Ιωάννη.....	74
Εικόνα 13.Επιτρεπόμενες διαδρομές με αλλαγή για την εξυπηρέτηση ζήτησης του σταθμού μετρό της Δάφνης και του Αγίου Δημητρίου.	75
Εικόνα 14.Επιτρεπόμενες διαδρομές με αλλαγή για την εξυπηρέτηση ζήτησης του σταθμού μετρό του Αγίου Ιωάννη και του Αγίου Δημητρίου.	76

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Σύγκριση αυτόνομων αρθρωτών λεωφορείων με παραδοσιακά λεωφορεία	27
Πίνακας 2. Συγκεντρωτικός πίνακας ερευνών.....	31
Πίνακας 3. Συμβολισμοί μαθηματικού μοντέλου	35
Πίνακας 4. Ζήτηση από τις στάσεις λεωφορείων προς τις στάσεις μετρό	56
Πίνακας 5. Χρόνος εξυπηρέτησης κάθε στάσης και χρόνος από αμαξοστάσιο	56
Πίνακας 6. Αποστάσεις μεταξύ των στάσεων του λεωφορείου προς το μετρό Δάφνης	57
Πίνακας 7. Αποστάσεις μεταξύ των στάσεων του λεωφορείου προς το μετρό Αγίου Ιωάννη	57
Πίνακας 8. Αποστάσεις μεταξύ των στάσεων του λεωφορείου προς το μετρό Αγίου Δημητρίου.....	58
Πίνακας 9. Χρόνοι ταξιδιού που απαιτούνται μεταξύ των στάσεων του λεωφορείου και προς το μετρό της Δάφνης.....	58
Πίνακας 10. Χρόνοι ταξιδιού που απαιτούνται μεταξύ των στάσεων του λεωφορείου και προς το μετρό του Αγίου Ιωάννη.	59
Πίνακας 11. Χρόνοι ταξιδιού που απαιτούνται μεταξύ των στάσεων του λεωφορείου και προς το μετρό του Αγίου Δημητρίου.	59
Πίνακας 12. Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου για όλους τους συνδυασμούς.....	66

Πίνακας 13. Αρχικές διαδρομές με βάση τη ζήτησή προς το μετρό της Δάφνης και του Αγίου Ιωάννη.....	69
Πίνακας 14. Αρχικές διαδρομές με βάση τη ζήτησή προς το μετρό της Δάφνης και του Αγίου Δημητρίου.....	69
Πίνακας 15. Αρχικές διαδρομές με βάση τη ζήτησή προς το μετρό του Αγίου Ιωάννη και του Αγίου Δημητρίου	70
Πίνακας 16. Επιτρεπόμενες διαδρομές με αλλαγές για κάθε συνδυασμό αρχικών διαδρομών.	70
Πίνακας 17.Στάσεις διαδρομών RS1-RS2.....	71
Πίνακας 18.Στάσεις διαδρομών RS1-RS3.....	71
Πίνακας 19.Στάσεις διαδρομών RS2-RS3.....	71
Πίνακας 20.Στόλος αρθρωτών αυτόνομων οχημάτων για ικανοποίηση ζήτησης για το σταθμό του μετρό της Δάφνης και του Αγίου Ιωάννη.....	72
Πίνακας 21.Στόλος αρθρωτών αυτόνομων οχημάτων για ικανοποίηση ζήτησης για το για το σταθμό του μετρό Δάφνης και Αγίου Δημητρίου	72
Πίνακας 22.Στόλος αρθρωτών αυτόνομων οχημάτων για ικανοποίηση ζήτησης για το για το σταθμό του μετρό Αγίου Ιωάννη και Αγίου Δημητρίου	73
Πίνακας 23. Συνολικός στόλος λεωφορείων	73

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1.Μεταβολή αριθμού μετεπιβιβάσεων σε σχέση με την ανοχή του χρόνου.....	78
Διάγραμμα 2.Μεταβολή του συνολικού κόστους σε σχέση με την ανοχή του χρόνου.....	78
Διάγραμμα 3.Μεταβολή αριθμού οχημάτων σε σχέση με την ανοχή του χρόνου.	78
Διάγραμμα 4.Μεταβολή αριθμού μετεπιβιβάσεων σε σχέση με τη χωρητικότητα.	80
Διάγραμμα 5.Μεταβολή του συνολικού κόστους σε σχέση με τη χωρητικότητα.	80
Διάγραμμα 6.Μεταβολή αριθμού οχημάτων σε σχέση με τη χωρητικότητα.....	81
Διάγραμμα 7.Μεταβολή αριθμού μετεπιβιβάσεων σε σχέση με τη ζήτηση.....	82
Διάγραμμα 8.Μεταβολή συνολικού κόστους σε σχέση με τη ζήτηση.	82
Διάγραμμα 9.Μεταβολή του αριθμού των οχημάτων σε σχέση με τη ζήτηση.....	83

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Εισαγωγή

Η κυκλοφοριακή συμφόρηση τις τελευταίες δεκαετίες, εξαιτίας της έλλειψης ισορροπίας μεταξύ προσφοράς και ζήτησης υποδομής (κυρίως σε ώρες αιχμής), αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στα σύγχρονα μητροπολιτικά κέντρα. Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται άμεσα με περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις (ατμοσφαιρική ρύπανση, ενεργειακή κατανάλωση κλπ.) που υπονομεύουν την ανθρώπινη υγεία, ενώ παράλληλα συνδέεται και με πληθώρα κοινωνικών αλλά και οικονομικών επιπτώσεων. Οι κυκλοφοριακές αυτές συνθήκες που έχουν διαμορφωθεί, οφείλονται κυρίως στην τάση προς τον ιδιωτικό τρόπο μετακίνησης και κατά συνέπεια στην εκρηκτική εξάπλωση των οχημάτων Ι.Χ. στα οδικά δίκτυα.

Η επιστημονική κοινότητα καλείται να ανταποκριθεί στην αύξηση της κυκλοφοριακής συμφόρησης, διαμορφώνοντας ένα ολοκληρωμένο, βιώσιμο και λειτουργικό σύστημα δημόσιας αστικής συγκοινωνίας με στόχο τη μείωση των ιδιωτικών οχημάτων. Στις περισσότερες αστικές περιοχές τα λεωφορεία, χαρακτηρίζονται από χαμηλή αποδοτικότητα και ποιότητα υπηρεσιών καθιστώντας τις συνθήκες μετακίνησης δυσχερείς. Ωστόσο, τα μέσα σταθερής τροχιάς (μετρό, ηλεκτρικός σιδηρόδρομος) φαίνεται ότι ανταποκρίνονται καλύτερα στις ανάγκες του συστήματος. Πρόκληση επομένως, αποτελεί μία σύγχρονη, άνετη και άμεση μορφή μετακίνησης, ικανή να αντικαταστήσει τα ιδιωτικά οχήματα, η οποία θα συνδέει αποτελεσματικά τις στάσεις κοντά στον τόπο κατοικίας των μετακινούμενων με τα μέσα σταθερής τροχιάς.

Τα οχήματα που θεωρούνται πιο ευέλικτα για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες μίας τέτοιας μορφής μετακίνησης, είναι τα λεωφορεία. Συχνά όμως, τα δρομολόγια που πραγματοποιούν τα συμβατικά λεωφορεία για την εξυπηρέτηση των μετακινούμενων από τον τόπο κατοικίας τους σε ένα μέσο σταθερής τροχιάς, συνδέονται με μεγάλες καθυστερήσεις (χρόνος αναμονής στις στάσεις και χρόνος ταξιδιού) ιδιαίτερα στις αραιοκατοικημένες περιοχές. Πολλές φορές μάλιστα, εξυπηρετούν και δρομολόγια με πολλές κενές θέσεις, επιβαρύνοντας το κόστος λειτουργίας τους. Επιπλέον, στις περιοχές αυτές, εντοπίζεται και το πρόβλημα του “πρώτου και τελευταίου

μιλίου”(first/last mile problem), όπως αναφέρεται στη σχετική βιβλιογραφία, όπου οι στάσεις δεν είναι εύκολα προσβάσιμες από τους μετακινούμενους, με αποτέλεσμα οι κάτοικοι να επιλέγουν το δικό τους όχημα για να μεταβούν καθημερινά στις δουλειές και τις δραστηριότητές τους.

Με την εξέλιξη όμως της τεχνολογίας, μία νέα μορφή δημόσιας συγκοινωνίας που συγκεντρώνει τα πλεονεκτήματα των λεωφορείων αλλά παράλληλα ανταποκρίνεται και στις προκλήσεις που προαναφέρθηκαν πρόκειται να βελτιώσει τις συνθήκες που επικρατούν στα οδικά δίκτυα και να περιορίσει σημαντικά το φαινόμενο της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Πρόκειται για την “Modular transit”, η οποία αντιπροσωπεύει μία ευέλικτη μορφή μετακίνησης, η οποία προσαρμόζεται στη ζήτηση, μέσω των αρθρωτών αυτόνομων λεωφορείων “Modular buses”. Η νέα αυτή τεχνολογία έχει υιοθετηθεί και έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης πολλών εταιριών όπως της NEXT (Next future transport, 2019), η οποία την έχει εφαρμόσει και παρουσιάσει στο Ντουμπάι.

1.2. Αντικείμενο και στόχος διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διαμόρφωση ενός προτύπου για το βέλτιστο σχεδιασμό ενός δικτύου τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείου. Τα λεωφορεία που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν, είναι γνωστά στη διεθνή βιβλιογραφία με τον όρο “Modular buses”, και πρόκειται για ηλεκτρικά αυτόνομα αρθρωτά οχήματα. Οι διαδρομές που πρόκειται να σχεδιαστούν, θα εξυπηρετούν τους μετακινούμενους που επιθυμούν να μεταβούν από ορισμένες στάσεις λεωφορείου σε σταθμούς του μετρό. Αφού βρεθούν οι αρχικές διαδρομές από όλες τις στάσεις λεωφορείου προς κάθε στάση μετρό, στόχο αποτελεί, η εύρεση των διαδρομών εκείνων που θα μπορούσαν να συνδεθούν, προκειμένου να εξυπηρετηθούν οι μετακινούμενοι με τη νέα τεχνολογία (“En-route transfer”), που παρέχουν τα λεωφορεία αυτά, ελαχιστοποιώντας το συνολικό τους κόστος. Η νέα αυτή τεχνολογία υπόσχεται να περιορίσει σημαντικά την κυκλοφοριακή συμφόρηση και παράλληλα να μετατρέψει τα λεωφορεία σε ένα ελκυστικό μέσο μετακίνησης.

Τα πρόβλημα που μελετάται, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία υπάγεται στην κατηγορία των προβλημάτων σχεδιασμού τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείου

(“Feeder Bus Network Design Problem”), το οποίο αποτελεί μία εξειδικευμένη κατηγορία των προβλημάτων σχεδιασμού αστικών συγκοινωνιών (“Transit Route Network Design Problem”). Πρόκειται για ένα από τα πιο περίπλοκα προβλήματα βελτιστοποίησης, κατηγορίας “NP-Hard” ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού. Για την υλοποίηση του διαμορφώθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο και στη συνέχεια εφαρμόστηκε ένας γενετικός αλγόριθμος.

Η έρευνα που παρουσιάζεται διαφέρει αρκετά από αυτές που έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν. Οι περισσότερες μελέτες στη βιβλιογραφία που παρουσιάζουν προβλήματα της κατηγορίας “Feeder Bus Network Design Problem” ,ακολουθούν το πρότυπο ζήτησης “Πολλά προς ένα” (“Many-to-one”). Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό, η περιοχή μελέτης συνδέεται με μία στάση προορισμού. Αντιθέτως, στην περίπτωση που μελετάται, το πρότυπο ζήτησης ανήκει στην κατηγορία “Πολλά προς πολλά” (“Many-to-many”), καθώς οι στάσεις λεωφορείων εξυπηρετούν 3 σταθμούς σταθερής τροχιάς (πολλούς προορισμούς). Επιπλέον, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της που τη διαφοροποιεί από τις υπόλοιπες, είναι ότι σε αντίθεση με άλλες που υποθέτουν ότι η ζήτηση για τους σταθμούς του μετρό είναι προκαθορισμένη και σταθερή, στη μελέτη αυτή, το μοντέλο έχει διαμορφωθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να ανταποκρίνεται σε πιθανές αλλαγές. Για το λόγο αυτό, ανήκει και σε μία άλλη κατηγορία προβλημάτων που αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία ως “Συστήματα μεταφοράς ανταποκρινόμενα στη ζήτηση”. Τέλος, η σημαντικότερη ίσως διαφορά της, είναι ότι ο βέλτιστος σχεδιασμός, δε χρησιμοποιεί συμβατικά λεωφορεία, αλλά αντιθέτως, ηλεκτρικά αυτόνομα αρθρωτά λεωφορεία τα οποία έχουν τη δυνατότητα να ενώνονται και να αποσυνδέονται μεταξύ τους για να εξυπηρετήσουν τη ζήτηση και να ικανοποιήσουν μέσω της μετάβασης σε άλλο όχημα, διαφορετικούς προορισμούς.

1.3. Δομή κεφαλαίων

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από 6 κεφάλαια, καθώς επίσης και τον πίνακα περιεχομένων, εικόνων, πινάκων και διαγραμμάτων, τη βιβλιογραφία και το παράρτημα.

Το κεφάλαιο 1 αποτελεί ένα εισαγωγικό κεφάλαιο το οποίο παρουσιάζει συνοπτικά το θέμα και το στόχο της διπλωματικής εργασίας. Στο κεφάλαιο 2,

πραγματοποιείται μία εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση σε μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί παρουσιάζοντας τα βασικά τους χαρακτηριστικά και τους στόχους υλοποίησης τους. Το πρώτο μέρος της βιβλιογραφίας περιλαμβάνει έρευνες που σχετίζονται με το πρόβλημα σχεδιασμού τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείου (“FNPD”), ενώ στο δεύτερο μέρος, παρουσιάζονται ορισμένες μελέτες που υπάρχουν στην κατηγορία “Συστήματα μεταφοράς ανταποκρινόμενα στη ζήτηση”. Στο τελευταίο μέρος της βιβλιογραφίας, το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό, αναλύονται οι μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί για τα αρθρωτά αυτόνομα ηλεκτρικά οχήματα. Στο κεφάλαιο 3, παρουσιάζεται αναλυτικά το πρόβλημα και διαμορφώνεται το μαθηματικό του μοντέλο με την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς του. Το κεφάλαιο 4 περιλαμβάνει το θεωρητικό υπόβαθρο των γενετικών αλγορίθμων αλλά και την εφαρμογή του στο μοντέλο. Στο κεφάλαιο 5, αρχικά παρουσιάζονται τα δεδομένα και η περιοχή μελέτης στην οποία θα εφαρμοστεί ο αλγόριθμος, ενώ στη συνέχεια του κεφαλαίου, αναλύονται τα αποτελέσματα του λογισμικού “EvoInver” και η βέλτιστη λύση του προβλήματος. Τέλος, στο κεφάλαιο 6 σχολιάζονται τα συμπεράσματα της έρευνας και παρατίθενται ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω ανάπτυξη και βελτίωση του προβλήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, πραγματοποιείται μία εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση σε όλες τις έρευνες που μελετήθηκαν, για την διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Οι μελέτες αυτές, ομαδοποιήθηκαν σε 3 διαφορετικές κατηγορίες, με βάση το περιεχόμενό τους. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει πληθώρα ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί για το σχεδιασμό ενός δικτύου με τροφοδοτικές γραμμές λεωφορείου (με χρήση συμβατικών λεωφορείων). Η δεύτερη κατηγορία, συγκεντρώνει μελέτες που σχετίζονται τα συστήματα “Ανταποκρινόμενων Μεταφορών στη Ζήτηση”, γνωστά στη διεθνή βιβλιογραφία με τον όρο συστήματα “DRT” (“Demand Responsive Transport”). Στην τελευταία κατηγορία, παρουσιάζονται μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί για το σχεδιασμό και τη λειτουργία δικτύων με αυτόνομα αρθρωτά ηλεκτρικά λεωφορεία (“modular buses”).

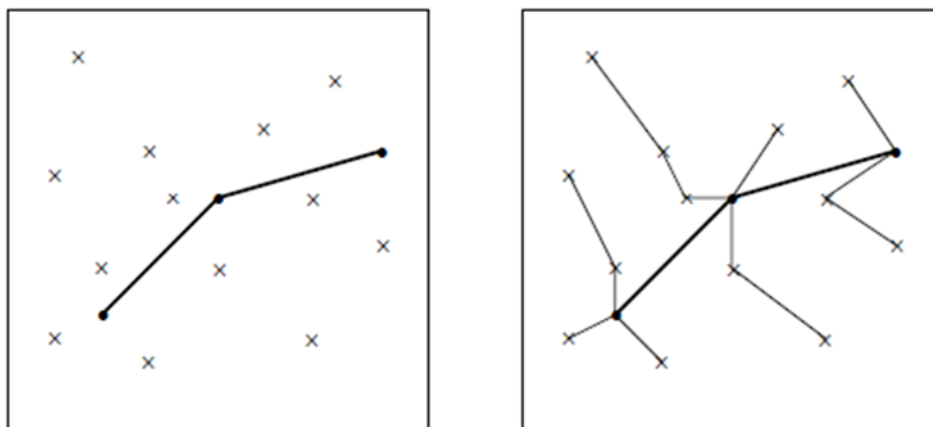
2.2. Σχεδιασμός δικτύου τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείων

2.2.1. Ορισμός του προβλήματος

Όπως έχει αναφερθεί, η ολοένα και αυξανόμενη χρήση των ιδιωτικών οχημάτων αποτελεί την βασικότερη αιτία για την κυκλοφοριακή συμφόρηση που παρατηρείται στα σύγχρονα αστικά κέντρα. Πολλοί μετακινούμενοι χρησιμοποιούν καθημερινά το αυτοκίνητο τους για να μεταβούν στην πιο κοντινή στάση μετρό και έπειτα φθάνουν στον προορισμό τους. Ο κυριότερος λόγος, είναι ότι αυτή η μορφή μαζικής μεταφοράς είναι γρήγορη, αξιόπιστη και ικανή να ανταποκριθεί ακόμα και σε αυξημένη ζήτηση. Στόχος όμως, είναι να σχεδιαστεί ένα ελκυστικό σύστημα αστικής συγκοινωνίας το οποίο θα εξυπηρετεί τους μετακινούμενους από τον τόπο κατοικίας τους μέχρι τον προορισμό τους. Το πρόβλημα εντοπίζεται στη σύνδεση του τόπου κατοικίας των μετακινούμενων με τα μέσα σταθερής τροχιάς (μετρό, ηλεκτρικός κ.α.). Για το σύνδεση των περιοχών με τα μέσα σταθερής τροχιάς με τη χρήση λεωφορείων, αναπτύχθηκε το πρόβλημα του σχεδιασμού τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείων το

οποίο αποτελεί μία εξειδικευμένη μορφή του γενικότερου προβλήματος σχεδιασμού δικτύου αστικών συγκοινωνιών.

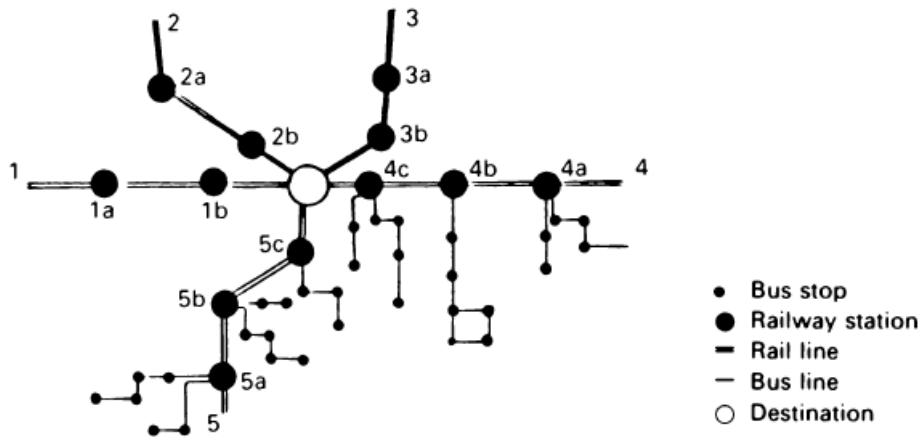
Για το σχεδιασμό του συστήματος, είναι απαραίτητο να οριστεί μία περιοχή με προκαθορισμένες στάσεις και με ένα υφιστάμενο σύστημα σιδηροδρομικών μεταφορών. Στόχο του προβλήματος, αποτελεί η σύνδεση των στάσεων αυτών με τους σταθμούς του ηλεκτρικού σιδηρόδρομου (ή του μετρό), ελαχιστοποιώντας φυσικά το συνολικό κόστος. Όπως φαίνεται και στην *εικόνα 1*, το σύστημα αποτελείται από δύο είδη κόμβων που αντιστοιχούν σε σταθμούς λεωφορείου και σιδηροδρομικού δικτύου. Στην *εικόνα 1α* (αριστερά), οι 3 κόμβοι που συνδέονται μεταξύ τους μέσω των 2 συνδέσμων, καθορίζουν το υφιστάμενο σιδηροδρομικό δίκτυο, ενώ στην *εικόνα 1β* (δεξιά), οι σύνδεσμοι που συνδέουν τις στάσεις λεωφορείου με το υφιστάμενο σιδηροδρομικό δίκτυο αναπαριστούν τις τροφοδοτικές γραμμές των λεωφορείων.



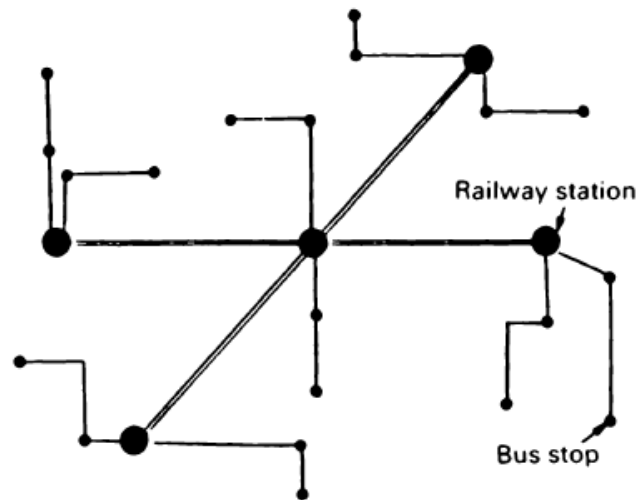
Εικόνα 1: Πρόβλημα σχεδιασμού τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείων (Πηγή: Kuan sze nee, 2003)

Το πρόβλημα αυτό, χωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με το πρότυπο ζήτησης. Στην πρώτη κατηγορία “Many-to-one” (*εικόνα 2*), το πρόβλημα περιλαμβάνει πολλούς σταθμούς προέλευσης και έναν σταθμό προορισμού, δηλαδή πολλές στάσεις λεωφορείων που καταλήγουν σε μία στάση μετρό (ή ηλεκτρικού σιδηρόδρομου), ενώ στη δεύτερη κατηγορία “Many to many” (*εικόνα 3*), το πρόβλημα περιλαμβάνει πολλούς σταθμούς προέλευσης και πολλούς σταθμούς προορισμού. Στην περίπτωση αυτή, το σύνολο των στάσεων του μετρό αποτελούν το σύνολο των προορισμών του προβλήματος και έτσι, μία στάση λεωφορείου μπορεί να ανήκει σε

παραπάνω από μία διαδρομή, για να εξυπηρετεί τη ζήτηση για διαφορετικούς προορισμούς. Πρόκειται επομένως, για μία πιο περίπλοκη περίπτωση που όμως σύμφωνα με τους Kuah and Perl μπορεί να αντιμετωπιστεί σαν πρόβλημα κατηγορίας “Many-to-one”(Kuah and Perl, 1989).



Εικόνα 2: Πρόβλημα του σχεδιασμού τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείων “Many-to-one”.
(Πηγή: *The Feeder-bus Network-design Problem*, G.K. Kuah, J. Perl 1989)



Εικόνα 3: Πρόβλημα του σχεδιασμού τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείων “Many-to-many”
(Πηγή: *The Feeder-bus Network-design Problem*, G.K. Kuah, J. Perl 1989)

2.2.2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Οι μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με το πρόβλημα σχεδιασμού τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείων παρουσιάζουν διαφορετικές μεθοδολογίες επίλυσης, χρησιμοποιούν διαφορετικά υπολογιστικά εργαλεία και εξυπηρετούν διαφορετικούς στόχους μέσω της αντικειμενικής τους συνάρτησης. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται σύντομα οι πιο σημαντικές από αυτές.

Μία από τις πρώτες μελέτες που πραγματοποιήθηκε στο πανεπιστήμιο Calgary του Καναδά από τον Wirasinghe (1980), χρησιμοποιεί ένα προσεγγιστικό αναλυτικό μοντέλο το οποίο εφαρμόζεται στο σύστημα “LRT Calgary” σε πρωινή ώρα αιχμής. Πρόκειται για ένα πρόβλημα κατηγορίας “Many-to-one”, στο οποίο όλοι οι μετακινούμενοι χρησιμοποιούν τις τροφοδοτικές γραμμές των λεωφορείων για να μεταβούν στους σιδηροδρομικούς σταθμούς.

Μία από τις πιο σημαντικές έρευνες στο πρόβλημα σχεδιασμού τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείων θεωρείται εκείνη του Kuah and Perl (1988), η οποία εντόπισε τις αδυναμίες των προηγούμενων ερευνών και εξέτασε και την περίπτωση “Many-to-many”. Το αναλυτικό μοντέλο που παρουσιάζει το σχεδιασμό των τροφοδοτικών γραμμών σε υπάρχουσα σιδηροδρομική γραμμή, βελτιστοποιεί την απόσταση μεταξύ των στάσεων, την απόσταση κάθε διαδρομής αλλά και την πρόοδο της λειτουργίας των λεωφορείων. Μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης, ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος (κόστος συστήματος και κόστος προς τους επιβάτες). Το κόστος προς τους επιβάτες, σχετίζεται με το χρόνο που απαιτείται για να φθάσουν οι μετακινούμενοι στην στάση κοντινότερης απόστασης, το χρόνο αναμονής στις στάσεις και το χρόνο διάρκειας ταξιδιού. Σύμφωνα με τους Kuah and Perl (1998), η κατάλληλη χωροθέτηση των στάσεων είναι απαραίτητη για την ελαχιστοποίηση του κόστους, καθώς υπεισέρχεται μέσω του χρόνου στην αντικειμενική συνάρτηση. Για να στηρίξουν την υπόθεσή τους αυτή, ανέλυσαν τους συντελεστές που επηρεάζουν τη χωροθέτηση σε 3 διαφορετικές περιπτώσεις (ενιαία, σταθερή και μεταβλητή διάσταση). Τέλος, με αριθμητικά πειράματα απέδειξαν ότι το προτεινόμενο αυτό μοντέλο παρέχει λογικές λύσεις.

Οι Martins and Pato (1998) 10 χρόνια αργότερα, βασίστηκαν στη μελέτη του Kuah and Perl (1988), και με καλύτερες ευρετικές μεθόδους βελτίωσαν τις λύσεις. Το πρόβλημα που διαμορφώθηκε, θεωρείται ένα δύσκολο, μη γραμμικό, μη κυρτό μικτό

ακέραιο, κατηγορίας ‘NP-hard’. Για να βρουν την αρχική λύση, στηρίχτηκαν στη μελέτη Kuah and Perl (1988) και ανέπτυξαν τη μέθοδο Δύο Φάσεων. Στη συνέχεια, για να τη βελτιώσουν, χρησιμοποίησαν την μετά-ευρετική μέθοδο ‘αναζήτηση Tabu’ και την ‘τοπική αναζήτηση’. Έπειτα από μια σειρά προβλημάτων προσομοίωσης που ανταποκρίνονται σε πραγματικές συνθήκες, αποδείχθηκε ότι η πιο απλή μορφή της μεθόδου ‘Αναζήτηση Tabu’ αποτελεί και την πιο χρήσιμη ευρετική μέθοδο.

Μία ακόμα αξιοσημείωτη έρευνα από τους Shrivastava and O’Mahony (2006), πραγματοποιήθηκε με στόχο τη ταυτόχρονη βελτιστοποίηση των διαδρομών αλλά και των συχνοτήτων τους. Στη μελέτη αυτή, οι Shrivastava and O’Mahony ισχυρίζονται ότι επειδή τα συντονισμένα δρομολόγια των λεωφορείων καθορίζονται από τα προκαθορισμένα δρομολόγια της κύριας συγκοινωνίας, οι διαδρομές και τα χρονοδιαγράμματα τροφοδοσίας είναι συμπληρωματικά. Η αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου που παρουσιάζουν ελαχιστοποιεί το κόστος του συστήματος αλλά και το κόστος ως προς τους επιβάτες. Πιο συγκεκριμένα, το κόστος ως προς τους επιβάτες, συμπεριλαμβάνει το κόστος που σχετίζεται με το χρόνο μέσα στο όχημα και το χρόνο μεταφοράς μετακινούμενου, μεταξύ του σταθμού του μετρό και του λεωφορείου, ενώ το κόστος προς το σύστημα σχετίζεται με το κόστος λειτουργίας των λεωφορείων. Η παραβίαση ορισμένων περιορισμών όπως το μέγεθος του στόλου και η ανικανοποίητη ζήτηση προσθέτει ποινές στην αντικειμενική συνάρτηση. Το μοντέλο που σχεδιάστηκε, εφαρμόστηκε στο μετρό Dun Laoghaire στο Δουβλίνο.

Σύμφωνα με την μελέτη που πραγματοποίησαν οι Ciaffi et al (2012), οι τροφοδοτικές γραμμές λεωφορείων συμβάλλουν σε ένα πιο ολοκληρωμένο δίκτυο διαμετακόμισης μειώνοντας το συνολικό χρόνο ταξιδιού παρά την αύξηση των μεταφορών. Στόχο της έρευνας αυτής, αποτέλεσε η ταυτόχρονη δημιουργία διαδρομών και συχνοτήτων σε ένα αστικό δίκτυο μεγάλων διαστάσεων. Η προτεινόμενη λύση προκύπτει από δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, με τη χρήση ενός ευριστικού αλγορίθμου, παράγονται δύο ομάδες λογικών διαδρομών, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη κάλυψη της περιοχής αλλά και η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου ταξιδιού. Στο δεύτερο στάδιο, μέσω ενός γενετικού αλγορίθμου καθορίζονται οι βέλτιστες διαδρομές με τις συχνότητες τους μέσω επαναληπτικής διαδικασίας. Η αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου, συμπεριλαμβάνει το κόστος του συστήματος, το κόστος προς τους επιβάτες αλλά και μία ποινή για την

ανικανοποίητη ζήτηση. Το μοντέλο εφαρμόστηκε πρώτα στο σύστημα δημόσιας συγκοινωνίας της Winnipeg και έπειτα στη Ρώμη.

Η βιβλιογραφία περιλαμβάνει όμως και πολλές νέες μελέτες που επικεντρώνουν το ενδιαφέρον τους στο πρόβλημα αυτό, όπως εκείνη του Lee et al (2021). Η συγκεκριμένη έρευνα προτείνει μία σειρά αλγορίθμων για τη βελτιστοποίηση των διαδρομών με βάση τη ζήτηση ελαχιστοποιώντας το κόστος του συστήματος αλλά και των χρηστών. Ο πρώτος αλγόριθμος, στοχεύει στη βελτιστοποίηση των διαδρομών λαμβάνοντας υπόψιν την επαναχωροθέτηση των λεωφορείων έτσι ώστε να παρέχεται μία υπηρεσία από πόρτα σε πόρτα. Ο δεύτερος αλγόριθμος βελτιστοποίησης, συμπεριλαμβάνει τις προσωρινές στάσεις τροφοδότησης και αξιολογεί τις ανισταθμίσεις μεταξύ του λιγότερου χρόνου περπατήματος, του λιγότερου χρόνου ταξιδιού και του κόστους λειτουργίας της υπηρεσίας. Επιπλέον, στην έρευνα αυτή, αναπτύσσονται και μεταθεριστικοί αλγόριθμοι, για τη δημιουργία ενός συνόλου διαδρομών για μια υπηρεσία τροφοδοσίας που ανταποκρίνεται στη ζήτηση και συνδέεται με μία γραμμή κύριου σιδηροδρόμου.

Μία ακόμα πρόσφατη έρευνα του Zheng et al. (2020), για να επιλύσει το πρόβλημα σχεδιασμού τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείων, χρησιμοποιεί έναν μεταθεριστικό αλγόριθμο γνωστό ως “Tabu search”. Εξαιτίας του μεγάλου όγκου του προβλήματος βελτιστοποίησης, ο αλγόριθμος αποσυνθέτει το πρόβλημα σε τρεις φάσεις: το διαχωρισμό της περιοχής που θα πραγματοποιηθεί η τροφοδοσία, την επιλογή των πιθανών στάσεων και το πρόβλημα σχεδιασμού. Στην πρώτη φάση η περιοχή χωρίζεται σε πολλές υποπεριοχές και έπειτα, στη δεύτερη φάση, οι στάσεις με το λιγότερο συνολικό κόστος από κάθε υποπεριοχή επιλέγονται ως υποψήφιας για το όριο του λειτουργικού κόστους. Τέλος, επιλέγεται η συντομότερη κυκλική διαδρομή που περνάει από κάθε υποψήφια στάση καθορίζοντας έτσι την λειτουργική κατεύθυνση. Το μοντέλο εφαρμόστηκε σε μία κεντρική περιοχή της πόλης Suzhou της Κίνας, προκειμένου να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητά της.

Μία ακόμα μελέτη που επιλύει το πρόβλημα ενσωματώνοντας τις νέες τεχνολογίες είναι εκείνη του Wang et al (2020). Η έρευνα αυτή, βασίζεται σε μεθόδους βελτιστοποίησης για να προτείνει διαδρομές σε ένα σύστημα τροφοδοσίας ‘HFRT’ (“High-Freedom Responsive Feeder Transit”), χρησιμοποιώντας πολλαπλούς τύπους οχημάτων. Διαμορφώνεται λοιπόν, ένα πρόβλημα ακέραιου γραμμικού

προγραμματισμού και το υβρίδιο ενός μεταθεριστικού αλγορίθμου, για την εύρεση των διαδρομών και των χρονοδιαγραμμάτων τους. Για την περιοχή εξυπηρέτησης, προτείνεται μία μεταθεριστική μέθοδο βασισμένη στην ισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης. Το μοντέλο εφαρμόστηκε για έναν σταθμό της γραμμής 1 του μετρό στη Changsha. Τα αποτελέσματα απέδειξαν ότι με τις παραπάνω μεθόδους μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά η κάλυψη των θέσεων και κατά συνέπεια και ο αριθμός των αναχωρήσεων και η μέση απόσταση ταξιδιού ανά επιβάτη. Με τη βελτιστοποίηση της περιοχής εξυπηρέτησης αντίστοιχα περιορίζεται το πρόβλημα του τελευταίου μιλίου.

2.3. Ανταποκρινόμενη στη ζήτηση μεταφορά

2.3.1. Ορισμός προβλήματος

Όπως έχει διαπιστωθεί, τα οφέλη της δημόσιας συγκοινωνίας στην κοινωνία (αποσυμφόρηση οδικού δικτύου, θετικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, στην ανθρώπινη υγεία, οικονομική ανάπτυξη κλπ.) είναι αδιαμφισβήτητα, και πολλές φορές μάλιστα, όταν το επίπεδο εξυπηρέτησης είναι ικανοποιητικό, τα μέσα μαζικής μεταφοράς μπορούν να ανταγωνιστούν ακόμα και το ιδιωτικό αυτοκίνητο. Τα διαθέσιμα μέσα εκτελούν σταθερές διαδρομές και λειτουργούν αποτελεσματικά σε περιοχές με μεγάλη πυκνότητα και υψηλή ζήτηση. Η αδυναμία όμως των συστημάτων αυτών, εντοπίζεται κυρίως σε αραιοκατοικημένες περιοχές με χαμηλή ζήτηση, όπου παρατηρείται συχνά και το πρόβλημα του πρώτου και του τελευταίου μιλίου. Εξαιτίας της περιορισμένης συνδεσιμότητας των περιοχών αυτών αλλά και της προσβασιμότητας στις στάσεις από τους μετακινούμενους, τα ιδιωτικά οχήματα απέκτησαν συντριπτικό πλεονέκτημα το οποίο είχε ως άμεσο αποτέλεσμα και την εκρηκτική εξάπλωσή τους. Την αδυναμία αυτή του συστήματος, καλείται να καλύψει ένα σύστημα μεταφορών «Ανταποκρινόμενο στην ζήτηση» ή “Demand Responsive Transport System” (“DRT system”), όπως είναι γνωστό στην διεθνή ορολογία. Σύμφωνα με τον Bakker (1990) πρόκειται για μία επιλογή μετακίνησης η οποία βρίσκεται σε επίπεδα ευελιξίας και ανέσεων, μεταξύ του ιδιωτικού οχήματος και των συμβατικών τρόπων μεταφοράς.

Η ευέλικτη αυτή υπηρεσία μεταφορών, η οποία είναι και αρκετά διαδεδομένη σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες, λειτουργεί συμπληρωματικά με τα συμβατικά μέσα

μεταφοράς και εξυπηρετεί συνήθως μη προγραμματισμένες ανάγκες μετακίνησης σε περιοχές και ώρες της μέρας που η ζήτηση είναι χαμηλή.

Τα τελευταία χρόνια, εξαιτίας των τεχνολογικών εξελίξεων, η “Ανταποκρινόμενη στη ζήτηση μεταφορά” αποτελεί ένα ιδιαίτερα ελκυστικό εργαλείο για το σχεδιασμό του συστήματος συγκοινωνίας. Πιο συγκεκριμένα, με τη βοήθεια των νέων τεχνολογιών, όπως πχ. με τη χρήση εφαρμογών ή ιστοσελίδων στο διαδίκτυο οι μετακινούμενοι θα μπορούν να διαμορφώσουν ένα αίτημα μετακίνησης λίγες ώρες πριν, δηλώνοντας τη στάση προορισμού και προέλευσης έτσι ώστε να πραγματοποιούνται διαδρομές μόνο όταν υπάρχει ζήτηση. Επιπλέον, στην υπηρεσία έχουν πραγματοποιηθεί και πολλές τεχνολογικές βελτιώσεις με την πάροδο του χρόνου, στα λογισμικά χωρικής αλλά και χρονικής δρομολόγησης καθιστώντας την έτσι, πιο αποδοτική και λειτουργική.

2.3.2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Ο Davison et al (2013), διερεύννησε μία παροχή υπηρεσιών “DRT”, στη Μεγάλη Βρετανία προκειμένου να προσδιορίσει τα διαφορετικά είδη που παρουσιάζονται, εξετάζοντας την αποτελεσματικότητα της λειτουργίας τους. Η μελέτη αυτή, βασίζεται σε μία εθνική έρευνα των παρόχων “DRT”, με απώτερο σκοπό να εξετάσει το σχεδιασμό, την απόδοση αλλά και τις προοπτικές των υπηρεσιών αυτών στη χώρα. Παρατηρήθηκε, ότι το ενδιαφέρον τόσο από τον ιδιωτικό όσο και από τον δημόσιο τομέα συνεχώς αυξάνεται αφού η υπηρεσία αυτή μπορεί να παρέχει ικανοποιητική πρόσβαση και γεωγραφική κάλυψη. Ωστόσο, το υψηλό κόστος, τα ανεπαρκή έσοδα και ο περιορισμένος αριθμός των συστημάτων που έχουν αναγνωριστεί ως οικονομικά βιώσιμα, ανησυχούν τους παρόχους. Το αποτέλεσμα είναι οι υπηρεσίες αυτές, ή να αποσύρονται, ή να εξυπηρετούν μόνο την κάλυψη τοπικών αναγκών. Παρόμοια έρευνα πραγματοποιηθεί και λίγα χρόνια νωρίτερα, από τους Laws et al (2009), πάλι στη Μεγάλη Βρετανία και κατέληξε στο γεγονός, ότι παρά τις προοπτικές του συστήματος στο μέλλον, πρέπει να διεξαχθούν πολλές έρευνες για να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που παρατηρήθηκαν.

Μία πρόσφατη μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε μία περιοχή της Αθήνας από τους Charisis et al. (2018), στοχεύει στο σχεδιασμό μίας υπηρεσίας “DRT” η οποία έχει ως στόχο τη σύνδεση της περιοχής μελέτης με κάποιους σταθμούς της γραμμής του

μετρό, και υλοποιείται μέσω ενός γενετικού αλγορίθμου. Στο πρόβλημα αυτό, όλοι οι επιβάτες εξυπηρετούνται από προκαθορισμένες στάσεις λεωφορείου και καταλήγουν σε μία στάση μετρό. Στην περίπτωση ανικανοποίητης ζήτησης, ένα επιπλέον λεωφορείο πραγματοποιεί μία επιπλέον κυκλική διαδρομή για να εξυπηρετήσει και τους υπόλοιπους μετακινούμενους. Η αντικειμενική συνάρτηση έχει ως στόχο να ελαχιστοποιήσει το χρόνο ταξιδιού, τον αριθμό των διαδρομών και την ανικανοποίητη ζήτηση. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι ο χρόνος ταξιδιού για τους μετακινούμενους που βρίσκονται σε στάση που χαρακτηρίζεται από υψηλή ζήτηση είναι λιγότερος από ότι σε στάσεις με χαμηλότερη ζήτηση.

Μία νέα ακόμα έρευνα από τους Wang et al (2021) θέτει ως στόχο τη βελτιστοποίηση των διαδρομών σ' ένα σύστημα "DRT" προσαρμοσμένων λεωφορείων. Ο εναλλακτικός αυτό τρόπος δημόσιας συγκοινωνίας επιτρέπει στους επιβάτες να κάνουν κρατήσεις για ταξίδια, και οργανώνει τα διαθέσιμα οχήματα για να εξυπηρετήσει κοινές βόλτες. Ωστόσο, η απόδοση λειτουργίας περιορίζεται στη δρομολόγηση οχημάτων, στον αριθμό των στάσεων, και στο μήκος των χρόνων παράκαμψης. Στην έρευνα αυτή, ο Wang et al. υποστηρίζουν ότι παρόμοια κίνητρα μπορούν να προσελκύσουν τους μετακινούμενους σε συγκεκριμένες τοποθεσίες έτσι ώστε να μειωθεί ο χρόνος παράκαμψης. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση ο προσδιορισμός του κινήτρου θεωρείται κρίσιμος. Η έρευνα αυτή, παρουσιάζει μία προσέγγιση για να προσδιοριστεί το κίνητρο και έπειτα το ενσωματώνει στον αλγόριθμο των διαδρομών. Τα αποτελέσματα της, απέδειξαν ότι η προσέγγιση αυτή μπορεί να μειώσει τα συνολικά οχήματα, να εξυπηρετήσει περισσότερους επιβάτες (αφού θα τους έχει συγκεντρώσει σε συγκεκριμένες τοποθεσίες), να μειώσει το χρόνο ταξιδιού και να αυξήσει το κέρδος.

2.4. Αυτόνομα αρθρωτά ηλεκτρικά λεωφορεία

2.4.1. Ορισμός προβλήματος

Οι συμβατικές γραμμές λεωφορείων, μπορεί να παρέχουν σχετικά χαμηλή ποιότητα υπηρεσιών ιδιαίτερα σε αραιοκατοικημένες περιοχές που χαρακτηρίζονται από χαμηλή ζήτηση. Για το λόγο αυτό, στο πρόβλημα που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία, ο σχεδιασμός των τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείου θα

χρησιμοποιεί αντί για παραδοσιακά λεωφορεία, αυτόνομα ηλεκτρικά αρθρωτά λεωφορεία, τα οποία συγκεντρώνουν πολλά πλεονεκτήματα τα οποία αναλύονται στη συνέχεια.

Σύμφωνα με τους Zhang et al. (2020), κάθε “modular bus” (αρθρωτό αυτόνομο ηλεκτρικό λεωφορείο), αποτελείται από ένα βασικό όχημα (το οποίο είναι μεγαλύτερο σε μέγεθος και μπορεί να ανακτήσει μεγαλύτερη ταχύτητα) και από ένα ή περισσότερα αυτόνομα ηλεκτρικά οχήματα μικρότερης χωρητικότητας (trailer modules). Τα οχήματα αυτά, θα έχουν την δυνατότητα να ενώνονται και να αποσυνδέονται το ένα με το άλλο κατά τη διάρκεια του ταξιδιού έτσι ώστε να εξυπηρετούν μεγαλύτερο αριθμό μετακινούμενων όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο (Εικόνα 4). Επιπλέον, θα διαθέτουν μία πόρτα μπροστά και μία πίσω έτσι ώστε να μπορούν οι επιβάτες να μεταβούν απρόσκοπτα από το ένα όχημα στο άλλο, όσο αυτά είναι προσκολλημένα μεταξύ τους (“En-route-transfer”). Μέσω μίας εφαρμογής οι μετακινούμενοι θα δηλώνουν: την ώρα αναχώρησης και άφιξης, καθώς και τη στάση προορισμού και προέλευσης. Η εφαρμογή αυτή θα επεξεργάζεται τα αιτήματα των μετακινούμενων-ζήτησης, έτσι ώστε να εξυπηρετηθούν άμεσα και να φτάσουν εκεί που επιθυμούν στο λιγότερο δυνατό χρόνο από όποια στάση και αν βρίσκονται.

Πρόκειται επομένως για μία υπηρεσία “από πόρτα σε πόρτα” (“door-to-door”), η οποία θα προσφέρει μία άνετη, γρήγορη και ξεκούραστη μετακίνηση ακόμα και σε πιο αραιοκατοικημένες περιοχές. Συγχρόνως, θα ανταποκρίνεται αποτελεσματικά και στο πρόβλημα του πρώτου και του τελευταίου μιλίου, ελαχιστοποιώντας το χρόνο αναμονής και ταξιδιού. Τα οχήματα που θα εξυπηρετούν τις πιο απομακρυσμένες στάσεις επειδή θα ταξιδεύουν με πιο χαμηλές ταχύτητες και θα είναι μικρότερα σε μέγεθος και θα είναι αυτόνομα. Η απουσία αυτή του οδηγού στα αυτόνομα οχήματα, μειώνει σημαντικά το κόστος λειτουργίας του συστήματος συγκριτικά με τα παραδοσιακά λεωφορεία. Αξίζει επιπλέον να σημειωθεί, ότι στα δρομολόγια που πραγματοποιούνται με τα παραδοσιακά λεωφορεία στις πιο αραιοκατοικημένες περιοχές, οι περισσότερες θέσεις είναι κενές. Το γεγονός αυτό που σχετίζεται με την αδυναμία του συστήματος να προσαρμοστεί στη ζήτηση και μεταφράζεται ως επιπλέον κόστος για το σύστημα. Επομένως, πέρα από την ποιότητα στην υπηρεσία που προσφέρουν και την ελαχιστοποίηση του χρόνου, τα “modular buses” αποτελούν μία λύση με μεγάλα οικονομικά οφέλη. Τέλος, σύμφωνα με την NEXT (Next future transport, 2019), η νέα αυτή τεχνολογία υπόσχεται να μειώσει από 15%-75% την

κυκλοφοριακή συμφόρηση, η οποία πλέον συγκαταλέγεται στα σημαντικότερα προβλήματα των μεγάλων αστικών κέντρων. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα πλεονεκτήματα των αρθρωτών αυτόνομων ηλεκτρικών οχημάτων, συγκριτικά με τα παραδοσιακά λεωφορεία.



Εικόνα 4: Αρθρωτά αυτόνομα ηλεκτρικά λεωφορεία. (Πηγή: <https://www.next-future-mobility.com/>)

Πίνακας 1. Σύγκριση αυτόνομων αρθρωτών λεωφορείων με παραδοσιακά λεωφορεία

	Αρθρωτά αυτόνομα λεωφορεία	Παραδοσιακά λεωφορεία
Επίπεδο παροχής υπηρεσιών	Υψηλό	Ποικίλλει (χαμηλό, μέτριο, πιο σπάνια υψηλό)
Χωρητικότητα	Προσαρμόζεται	Δεν προσαρμόζεται
Πρόβλημα πρώτου και τελευταίου μιλίου	Ανταποκρίνεται	Δεν ανταποκρίνεται
Καθυστερήσεις	Ελαχιστοποιούνται	Μεγιστοποιούνται
Κυκλοφοριακή συμφόρηση	Μείωση 15%-75%	Επιβαρύνει σημαντικά
Οδηγός	Δεν χρειάζεται	Ένας σε κάθε λεωφορείο

2.4.2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερες μελέτες επικεντρώνουν το ενδιαφέρον τους στην ενσωμάτωση των αρθρωτών ηλεκτρικών λεωφορείων στο σύστημα δημόσιας συγκοινωνίας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι πιο σημαντικές που έχουν πραγματοποιηθεί και τέλος δίνεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας όλων των ερευνών που μελετήθηκαν.

Μία έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο πανεπιστήμιο Michigan στις ΗΠΑ από τους Zhang et al (2020), μελετά πως ανταποκρίνεται το σύστημα αυτό σε ένα μικρό τμήμα του Sioux Falls αλλά και σε ένα μεγαλύτερης έκτασης σύστημα δημόσιας συγκοινωνίας στο Manhattan. Για να λυθεί με ένα εργαλείο βελτιστοποίησης (“commercial solver”), το πρόβλημα μοντελοποιήθηκε σε ένα διευρυμένου χρόνου δίκτυο, μειώνοντας έτσι το μέγεθος του προβλήματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ένα αρθρωτό λεωφορείο μπορεί να εξυπηρετήσει αποτελεσματικά τόσο τις μικρές όσο και τις μεγάλες διαδρομές. Ανάλογα με τον αριθμό των αιτημάτων των μετακινούμενων που πρόκειται να εξυπηρετηθούν, προκύπτει και ο αριθμός των βασικών οχημάτων (“main modules”) και των οχημάτων που προσκολλούνται σε αυτά (“trailer modules”). Η αναλογία αυτή, πρέπει να είναι βέλτιστη έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η υψηλή ποιότητα της υπηρεσίας χωρίς να αυξάνονται σημαντικά τα χιλιόμετρα ταξιδιού.

Μία ακόμα μελέτη από τους Pei et al (2021) που πραγματοποιήθηκε πάλι σε δύο δίκτυα διαφορετικού μεγέθους αποδεικνύει ότι η τεχνολογία αυτή περιορίζει το κόστος του συστήματος, της λειτουργίας του αλλά και το κόστος που σχετίζεται με το χρόνο αναμονής. Για το βέλτιστο σχεδιασμό του συστήματος αναπτύχθηκε ένα μοντέλο μεικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος. Το μοντέλο, διαμορφώθηκε σε ένα πρόβλημα μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού έτσι ώστε να λυθεί με το εργαλείο βελτιστοποίησης “Gurobi”. Για το πρώτο πείραμα, επιλέχθηκαν 10 στάσεις από το σύστημα δημόσιας αστικής συγκοινωνίας του Guangzhou Higher Education Mega Center στην Κίνα με πραγματικά δεδομένα, ενώ για το δεύτερο επιλέχθηκαν 19 στάσεις από ένα μεγαλύτερο σύστημα στην Guangdong της Κίνας. Και στα δύο πειράματα, αποδείχθηκε ότι με η χρήση των αρθρωτών αυτόνομων οχημάτων, είναι πιο

αποτελεσματική από τις δύο επιπλέον εναλλακτικές που εξετάστηκαν (τα συμβατικά λεωφορεία και τα ιδιωτικά οχήματα).

Μία από τις σημαντικότερες έρευνες που πραγματοποιήθηκε από τους Chen et al (2019) (η οποία βασίζεται σε μία παρόμοια έρευνα που πραγματοποιήθηκε ένα χρόνο νωρίτερα από τους Chen et al 2018), απέδειξε ότι τα αρθρωτά αυτά ηλεκτρικά λεωφορεία, επειδή προσαρμόζονται όσο το δυνατόν καλύτερα στη χωρητικότητα, πέρα από την ποιότητα στην υπηρεσία που προσφέρουν στους μετακινούμενους, περιορίζουν τόσο το συνολικό κόστος που οφείλεται στο χρόνο αναμονής, όσο και στην κατανάλωση ενέργειας. Το πρόβλημα που παρουσιάζεται, κατατάσσεται στην κατηγορία προβλημάτων μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού και συνοδεύεται από 2 αριθμητικά πειράματα. Το πρώτο πείραμα αντλεί πραγματικά δεδομένα από την γραμμή Batong (του Πεκίνου) η οποία χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλή ζήτηση, ενώ το δεύτερο βασίζεται σε υποθετικά δεδομένα που αφορούν τη μελλοντική ζήτηση στην περιοχή Tampa Bay Area στις ΗΠΑ, η οποία χαρακτηρίζεται από χαμηλή ζήτηση. Και τα δύο πειράματα, εξετάζουν την επίδραση που έχουν διάφοροι παράγοντες εισόδου στην αποτελεσματικότητα του συστήματος αυτού για διαφορετικές συνθήκες κορεσμού. Η έρευνα απέδειξε ότι και στις δύο περιπτώσεις με μικρές διαφορές οι διαφορετικοί παράγοντες επηρεάζουν με τον ίδιο τρόπο. Ωστόσο, αποδεικνύεται, ότι τα αποτελέσματα του δυναμικού σχεδιασμού χωρητικότητας είναι πιο ισχυρά σε ένα ακόρεστο σύστημα όταν αλλάζουν οι παράμετροι εισόδου.

Μία ακόμα μελέτη με ιδιαίτερο ενδιαφέρον πραγματοποιήθηκε από τους Liu et al (2021) και αποδεικνύει πως τα λεωφορεία αυτά μπορούν να μειώσουν το κόστος λειτουργίας και να αναβαθμίσουν την ποιότητα εξυπηρέτησης των μετακινήσεων και σε μία νέα μορφή ευέλικτης μετακίνησης, γνωστή στη διεθνή ορολογία ως “Flex-route transit”, η οποία συνδυάζει την ευελιξία της “Demand-responsive transit” αλλά και το χαμηλό κόστος της “Fixed route transit”. Στην έρευνα αυτή, τα λεωφορεία, θα εξυπηρετούν μία διαδρομή προκαθορισμένων στάσεων σε μία ζώνη αυξημένης ζήτησης (“Fixed route transit”), αλλά και νέες διαδρομές εκτός των στάσεων αυτών για να ικανοποιήσουν τη ζήτηση και στην υπόλοιπη έκταση της περιοχής (“Demand-responsive transit”). Για τις ανάγκες του μοντέλου αυτού διατυπώνεται ένα πρόβλημα μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού το οποίο επιλύεται σε δύο στάδια (με δυναμικό προγραμματισμό και με τη χρήση προσεγγιστικών μεθόδων). Η έρευνα συνοδεύεται από αριθμητικά πειράματα, αλλά και από μία μελέτη περίπτωσης που

βασίζεται σε δεδομένα που αντλήθηκαν από πραγματικά δεδομένα ζήτησης της περιοχής Wangjing του Πεκίνου. Από τα πειράματα, αποδείχθηκε ότι οι υπηρεσίες “Flex-route transit” με τα αυτόνομα αρθρωτά λεωφορεία (“FlexRT-MAV”) είναι πιο αποτελεσματικές και ελκυστικές, λαμβάνοντας υπόψη ένα συνολικό γενικευμένο κόστος, από εκείνες με τα παραδοσιακά οχήματα (“FlexRT-TV”).

Συμπερασματικά, είναι φανερό ότι τα τελευταία χρόνια ολοένα και περισσότερες μελέτες επικεντρώνουν το ενδιαφέρον τους στο σχεδιασμό ενός συστήματος δημόσιας αστικής συγκοινωνίας με αρθρωτά αυτόνομα λεωφορεία. Όλες οι μελέτες καταλήγουν στο γεγονός ότι τα αρθρωτά αυτόνομα ηλεκτρικά λεωφορεία, μπορούν να ανταποκριθούν αποτελεσματικά στις ανάγκες του συστήματος αναβαθμίζοντας την ποιότητα των υπηρεσιών, ελαχιστοποιώντας τους απαιτούμενους χρόνους (ταξιδιού, αναμονής κλπ.) και ελαχιστοποιώντας το κόστος. Στον συγκεντρωτικό πίνακα παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι κυριότερες από αυτές.

Πίνακας 2. Συγκεντρωτικός πίνακας ερευνών

Έτος	Συγγραφείς	Αντικειμενική συνάρτηση	Μεταβλητές απόφασης	Είδος περιορισμών	Τοπολογία συστήματος	Μοντέλο προσέγγισης/ Αλγόριθμος
2019	Chen et al.	Κόστος ώρας αναμονής και κόστους αποστολής λεωφορείων	Χρονοδιάγραμμα και είδος οχήματος	Γραμμικό	Δίκτυο	Μαθηματικός Προγραμματισμός/ Δυναμικός προγραμματισμός
2019	Zhang et al.	Αριθμός αιτημάτων από μετακινούμενους που εξυπηρετούνται	Χρονοδιάγραμμα, είδος οχήματος	Γραμμικό	Δίκτυο	Μαθηματικός Προγραμματισμός
2020	Caros and Chow	Κόστος χρήστη και κόστος λειτουργίας συστήματος	Αλλαγή οχήματος κατά τη διάρκεια του ταξιδιού	Μη Γραμμικό	Πλήμνης-ακτινών	Προσομοίωση/ Ευρετική μέθοδος
2019	Nguyen et al.	Ταχύτητα οχήματος και άνεση μετακινούμενου	Χρονοδιάγραμμα	-	Άξονας	Προσομοίωση/ Ευρετική μέθοδος
2021	Pei et al.	Κόστος ώρας αναμονής και κόστος αποστολής λεωφορείων	Στρατηγικές αποστολής οχημάτων, είδος οχήματος, επιβάτες	Γραμμικό	Δίκτυο	Μαθηματικός Προγραμματισμός/
2019	Dai et al.	Κόστος λειτουργίας και κόστος ώρας αναμονής.	Είδος οχήματος, χρόνος αποστολής οχημάτων	Γραμμικό	Άξονας	Μαθηματικός Προγραμματισμός/ Δυναμικός προγραμματισμός
2019	Hatzenbuhler et al.	Κόστος λειτουργίας συστήματος και κόστος ως προς το χρήστη	Είδος οχήματος, χωρητικότητα, συχνότητα υπηρεσίας	-	Δίκτυο	Προσομοίωση/ Ευρετική μέθοδος
2021	Liu et al.	Κόστος λειτουργίας συστήματος και κόστος ώρας αναμονής	Χρονοδιάγραμμα, επιβάτες, διαδρομές	Γραμμικό	Δίκτυο	Μαθηματικός Προγραμματισμός/ Δυναμικός προγραμματισμός και ευρετική μέθοδος
2020	Ji et al.	Αξιοποίηση στόλου και κόστος ως προς το χρόνο εξυπηρέτησης του μετακινούμενου	Χρονοδιάγραμμα, είδος οχήματος	Γραμμικό	Δίκτυο	Μαθηματικός Προγραμματισμός και ευρετική μέθοδος
2018	Liu et al.	Αποτελεσματική χρήση χωρητικότητας	Χρονοδιάγραμμα	Γραμμικό	Δίκτυο	Μαθηματικός Προγραμματισμός

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

3.1. Εισαγωγή

Η ενότητα αυτή, περιλαμβάνει μία σύντομη περιγραφή του προβλήματος καθώς και την αναλυτική παρουσίαση του μαθηματικού μοντέλου που πρόκειται να διαμορφωθεί για την επίλυση. Στη συνέχεια, ακολουθεί η διατύπωση της αντικειμενικής συνάρτησης με από τους περιορισμούς της και τις μεταβλητές απόφασης.

3.2. Περιγραφή του προβλήματος

Το πρόβλημα που περιγράφεται, σχετίζεται με το σχεδιασμό τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείου, στις οποίες πραγματοποιείται η μετακίνηση κατά τη διάρκεια του ταξιδιού, γνωστή στη διεθνή βιβλιογραφία ως “En-route transfer” (εικόνα 5), μέσω των αρθρωτών αυτόνομων ηλεκτρικών λεωφορείων (“Modular buses”). Όλοι οι μετακινούμενοι θα επιβιβάζονται από προκαθορισμένες στάσεις λεωφορείων και θα καταλήγουν σε μία στάση μετρό που επιθυμούν. Ο διαθέσιμος στόλος θα αποτελείται από ομοιογενή αυτόνομα αρθρωτά οχήματα, τα οποία θα έχουν τη δυνατότητα να συνδέονται και να αποσυνδέονται μεταξύ τους για να εξυπηρετήσουν τη ζήτηση για τους τελικούς προορισμούς. Κάποιοι από τους μετακινούμενους θα χρειαστεί να μεταβούν σε άλλο όχημα στον κοινό κόμβο δύο διαδρομών, για να καταλήξουν στον τελικό προορισμό τους.



Εικόνα 5: Αλλαγή οχήματος κατά τη διάρκεια του ταξιδιού “En-route transfer”.
(Πηγή: <https://www.next-future-mobility.com/>)

Αφού βρεθούν οι αρχικές διαδρομές από όλες τις στάσεις λεωφορείων για κάθε στάση μετρό, (σύνολο διαδρομών που εξυπηρετούν κάθε φορά τη ζήτηση για διαφορετική στάση μετρό), μέσω των κοινών κόμβων και δύο περιορισμών, θα εντοπιστούν οι διαδρομές εκείνες για κάθε συνδυασμό αρχικών διαδρομών, στις οποίες θα μπορεί να πραγματοποιηθεί η μετάβαση σε άλλο όχημα κατά τη διάρκεια του ταξιδιού.

Αρχικά, απαραίτητη προϋπόθεση για να πραγματοποιηθεί η αλλαγή οχήματος κατά τη διάρκεια του ταξιδιού είναι οι διαδρομές που πρόκειται να συνδεθούν να έχουν τουλάχιστον έναν κοινό κόμβο. Επειδή στις αρχικές διαδρομές για κάθε στάση μετρό εξυπηρετούνται όλοι οι κόμβοι, όλες οι διαδρομές θα έχουν κοινούς κόμβους με άλλες. Επομένως, εφόσον όλες οι διαδρομές θα παρουσιάζουν κοινούς κόμβους με άλλες, για να επιτρέπεται η “En-route transfer” θα πρέπει να ικανοποιούνται δύο βασικοί περιορισμοί. Ο πρώτος περιορισμός, αφορά το χρόνο που απαιτείται για να διανύσει το όχημα (ή τα οχήματα), το τμήμα της διαδρομής από τον αρχικό κόμβο μέχρι τον κοινό κόμβο. Θα πρέπει δηλαδή οι χρόνοι άφιξης των οχημάτων των δύο διαφορετικών γραμμών να είναι εντός σύντομου χρονικού παραθύρου για να είναι εφικτή η αλλαγή. Ο περιορισμός αυτός είναι απαραίτητος έτσι ώστε η αλλαγή να πραγματοποιείται χωρίς καθυστερήσεις. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, η μέγιστη χρονική διαφορά που θα πρέπει να έχουν οι χρόνοι για να διανύσουν τα οχήματα το τμήμα αυτό της κάθε διαδρομής ισούται με 5 λεπτά. Σε περίπτωση που η χρονική αυτή διαφορά ξεπερνάει το 5 λεπτά, τα οχήματα δε θα μπορούν να συνδεθούν και να πραγματοποιήσουν την αλλαγή στον κοινό κόμβο.

Ο δεύτερος περιορισμός σχετίζεται με τον αριθμό των επιτρεπόμενων συνδεδεμένων οχημάτων στον κοινό κόμβο των δύο διαδρομών. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η μετάβαση από όχημα σε όχημα θα πραγματοποιείται όσο αυτά είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους στον κοινό κόμβο. Για να πραγματοποιηθεί η μετάβαση εύκολα και γρήγορα θα πρέπει ο αριθμός των συνδεδεμένων οχημάτων στον κοινό κόμβο να μην ξεπερνάει τα 3. Όσο περισσότερα οχήματα είναι συνδεδεμένα στον κοινό κόμβο, τόσο πιο δύσκολη θεωρείται η μετάβαση των μετακινούμενων σε άλλο όχημα. Από τον κοινό κόμβο και μετά, εφόσον όλα τα οχήματα θα καταλήγουν σε μία στάση μετρό χωρίς άλλη αλλαγή, δεν υφίσταται κάποιος περιορισμός για τα συνδεδεμένα οχήματα. Αν υπάρχουν μετακινούμενοι σε κάποια διαδρομή όπου μετά τον κοινό κόμβο δεν μπορούν να εξυπηρετηθούν με τα διαθέσιμα οχήματα, ένα επιπλέον όχημα

θα συνδέεται με τα υπόλοιπα στον κοινό κόμβο μετά την αλλαγή, για να μπορέσουν να φθάσουν στον τελικό προορισμό.

Επιπλέον, πέρα από τους περιορισμούς που τέθηκαν, διερευνήθηκαν 3 ειδικές περιπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα:

- Ο κοινός κόμβος να είναι και αρχικός σε μία από τις δύο διαδρομές. Στην περίπτωση αυτή θεωρήθηκε ότι πραγματοποιείται “En-route transfer” καθώς στον κοινό κόμβο μπορεί να πραγματοποιηθεί μετάβαση σε άλλο όχημα μετακινούμενων που έχουν επιβιβαστεί από μία στάση της άλλης διαδρομής με κατεύθυνση τη στάση μετρό που εξυπηρετεί η άλλη διαδρομή. Στην περίπτωση αυτή, όπως είναι αναμενόμενο ο χρόνος για να διανύσει το όχημα από τον αρχικό έως τον κοινό κόμβο στη διαδρομή αυτή ισούται με μηδέν (αφού ο αρχικός με τον κοινό κόμβο ταυτίζονται).
- Ο κοινός κόμβος να είναι και αρχικός και στις δύο διαδρομές. Στην περίπτωση αυτή δε θεωρείται ότι πραγματοποιείται “En-route transfer”. Δε χρειάζεται κάποιος μετακινούμενος να αλλάξει όχημα για να καταλήξει στη στάση μετρό που επιθυμεί.
- Οι διαδρομές που συνδέονται να έχουν παραπάνω από έναν κοινούς κόμβους. Σε αυτή την περίπτωση θεωρείται ότι πραγματοποιείται “En-route transfer” στον πρώτο κοινό κόμβο.

3.3. Μαθηματικό μοντέλο

Ο βέλτιστος αυτός σχεδιασμός τροφοδοτικών γραμμών, πρόκειται για ένα πρόβλημα ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού. Η μαθηματική αυτή διατύπωση του προβλήματος αποτελεί μία επέκταση του μαθηματικού μοντέλου του προβλήματος που πρότειναν οι Kuah and Perl (1989), οι Martins and Pato (1998) και ο Deng et al (2013). Ωστόσο, το μοντέλο περιλαμβάνει κάποιους ακόμα περιορισμούς που αναλύονται παρακάτω.

Για να εκφραστεί μαθηματικά το πρόβλημα ορίστηκε ένα σύνολο κόμβων C , που αναφέρεται στις στάσεις λεωφορείων του δικτύου. Επιπλέον, ορίστηκε και ένα σύνολο ακμών E όπου ορίζεται μονοσήμαντα από ένα ζεύγος (i,j) όπου $i,j \in V, j \neq i$. της διαδρομής του κάθε αυτόνομου αρθρωτού οχήματος για το ζεύγος αυτό.

Σύμφωνα με τα παραπάνω το μαθηματικό πρόβλημα διατυπώνεται ως εξής:

$$\min a * \sum_{i \in M} \sum_{j \in M} \sum_{k \in K} dist_{ijk} * C * X_{ijk} + b * \left(\sum_{j \in I} \sum_{k \in K} X_{0jk} + \sum_{j \in L} \sum_{k \in B} X_{0jk} \right) * F + c * \sum_{i \in M} \sum_{p \in P} U_{ip} * G \quad (1)$$

Πίνακας 3. Συμβολισμοί μαθηματικού μοντέλου

Συμβολισμός	Σημασία
Σύνολα	
I	Το σύνολο των κόμβων/στάσεων i,j (το τόξο ij αναφέρεται στις στάσεις i και j)
$I_k \subseteq I$	Το σύνολο των κοινών κόμβων i,j των διαδρομών που επιτρέπεται η “En-route transfer”.
$I_b \subseteq I$	Το σύνολο των αρχικών κόμβων i,j των διαδρομών που επιτρέπεται η “En-route transfer”.
$I_c \subseteq I$	Το σύνολο των κόμβων με ανικανοποίητη ζήτηση
K	Το σύνολο των modules k
P	Το σύνολο των σταθμών μετρό p, P=1,...,P
L	Το σύνολο των συνδέσμων ij
$M = I \cup P$	Το σύνολο M περιέχει τις στάσεις/κόμβους i συνόλου I_k και τους σταθμούς μετρό p του συνόλου P
$H \subseteq M$	Το υποσύνολο των στάσεων I, συμπεριλαμβανομένου και του συνόλου P ανήκουν στο σύνολο M
$B \subseteq K$	Το υποσύνολο των modules k των επιπλέον οχημάτων
Παράμετροι	
a,b,c	Τα βάρη στην αντικειμενική συνάρτηση
q_k	Η χωρητικότητα του module k
o_{ip}	Η συνολική ζήτηση από το σύνδεσμο i στη στάση του μετρό p.
C	Το κόστος που συνδέεται με τα χιλιόμετρα ταξιδιού που διανύει κάθε module k
F	Το κόστος που συνδέεται με το κόστος αγοράς οχημάτων
G	Το κόστος που συνδέεται με την ανικανοποίητη ζήτηση.
$dist_{ij}$	Η απόσταση του συνδέσμου ij
st_{ij}	Χρόνος εξυπηρέτησης της στάσης
Δt	Χρονική διαφορά για μετεπιβίβαση
e	Αριθμός επιτρεπόμενων συνδεδεμένων οχημάτων στον κοινό κόμβο
N	Πολύ μεγάλος αριθμός
Μεταβλητές απόφασης	
X_{ijk}	Δυναμική μεταβλητή που παίρνει τιμή 1 αν το τόξο ij βρίσκεται στη διαδρομή του module k, αλλιώς 0
U_{ip}	Αριθμός ανικανοποίητων μετακινούμενων στον κόμβο i για τη στάση του μετρό p.

l_{ijk}	Οι μετακινούμενοι που επιβιβάζονται σε κάθε τόξο ij στο module k
d_{ipk}	Ο αριθμός των επιβατών που ταξιδεύουν στον κόμβο i για το σταθμό του μετρό p στο module k
Tr_j	Δυαδική μεταβλητή που δείχνει αν γίνεται μετεπιβίβαση στον κόμβο j
E_{ijk}	Συνεχής μεταβλητή που δείχνει το χρόνο άφιξης του k στον κόμβο j

$$\sum_{i \notin H} \sum_{j \in H} \sum_{k=1}^K X_{ijk} \geq 1, \quad \forall H \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ijk} \leq 1, \quad \forall j \in M, k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j \in M} x_{ijk} \leq 1, \quad \forall i \in I, k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{I+P} X_{ipk} = 0, \quad k = 1, \dots, K, \forall p \in P \quad (5)$$

$$\sum_{j \in I} \sum_{p \in P} X_{ipk} \geq 1, \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{j \in M}^{1+P} x_{ijk} - \sum_{m \in I} x_{mik} \geq 0, \quad \forall i \in I, k \in I \quad (7)$$

$$\sum_{j \in I} l_{0jk} = 0, \quad \forall i \in I, k \in K \quad (8)$$

$$l_{ijk} \leq Q_k * x_{ijk} \quad \forall i \in I, j \in M, \forall k \in K \quad (9)$$

$$U_{ip} = O_{ip} - \sum_{k \in K/B} d_{ipk} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (10)$$

$$X_{ijk} * (E_{ij} - E_{ij} + \text{dist}_{ij} + st_{ij}) \leq 0 \quad (11)$$

$$\Delta \tau \geq |e_{jk} - e_{jw}| - N * (1 - Tr_j) \quad k, w \in K \quad j \in I_k \quad (12)$$

$$\Delta \tau < |e_{jk} - e_{jw}| + N * Tr_i \quad k, w \in W \quad j \in I_k \quad (13)$$

$$Tr_j * \left(\sum_{k=1} X_{ijk} + \sum_{k=1} X_{ljk} \right) \leq e \quad \forall i, l, j: j \in I_k \quad (14)$$

$$d_{ipw} = \min^*(Q_k^* \sum_{j \in M} x_{ijk} - \sum_{j \in M} l_{jik}, O_{ip}^* \sum_{j \in M} x_{jik}) \quad \forall i \in I, k \in K, \forall p \in P \quad (15)$$

$$\sum_{i \in I} l_{ijk} + d_{jpk} = \sum_{i \in I} l_{jik} \quad \forall j \in M, k \in K, \forall p \in P \quad (16)$$

3.3.1. Αντικειμενική συνάρτηση

Η εξίσωση (1) αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος που παρουσιάζεται και στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους του δικτύου, για όλες τις διαδρομές που μπορεί να πραγματοποιηθεί η “En-route transfer”. Το συνολικό κόστος καθορίζεται από 3 παραμέτρους.

- Το κόστος λειτουργίας του συστήματος. Για να είναι οικονομικά βιώσιμο το σύστημα που περιγράφεται θα πρέπει να ελαχιστοποιείται το κόστος λειτουργίας του για κάθε χιλιόμετρο που διανύεται από κάθε όχημα.
- Το κόστος που αντιστοιχεί στην αγορά των απαιτούμενων οχημάτων. Το κόστος αγοράς του στόλου οχημάτων, επιβαρύνει το συνολικό κόστος. Για το λόγο αυτό πρέπει εξυπηρετείται η ζήτηση με όσο το δυνατόν λιγότερα οχήματα.
- Το κόστος που αντιστοιχεί στην ανικανοποίητη ζήτηση. Για να θεωρείται ένα μέσο συγκοινωνίας αποτελεσματικό θα πρέπει να εξυπηρετεί αν όχι όλους, όσο το δυνατόν περισσότερους μετακινούμενους. Επομένως η ανικανοποίητη ζήτηση θα πρέπει να ελαχιστοποιείται.

3.2.2. Περιορισμοί

Στην υποενότητα αυτή, αναλύονται οι περιορισμοί του μαθηματικού μοντέλου που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα:

- Ο περιορισμός (2) εξασφαλίζει ότι κάθε υποσύνολο του συνόλου των στάσεων συνδέεται με έναν σταθμό μετρό.
- Οι περιορισμοί (3), (4) υποδηλώνουν ότι στις αρχικές διαδρομές ο κάθε κόμβος βρίσκεται το πολύ μία φορά σε κάθε αρχική διαδρομή.
- Ο περιορισμός (5) εξασφαλίζει ότι κάθε διαδρομή πρέπει να καταλήγει σε έναν σταθμό του μετρό.

- Ο περιορισμός (6) εξασφαλίζει ότι κάθε διαδρομή περιλαμβάνει τουλάχιστον ένα σταθμό λεωφορείου και ένα σταθμό μετρό.
- Ο περιορισμός (7) υποδεικνύει ότι κάθε διαδρομή λεωφορείου του βασικού δικτύου πρόκειται για μη κυκλική διαδρομή.
- Ο περιορισμός (8) εξασφαλίζει ότι στην αρχή το όχημα είναι άδειο δεν έχει επιβάτες.
- Σύμφωνα με την εξίσωση (9) εξασφαλίζεται ότι ο συνολικός αριθμός των επιβατών δεν υπερβαίνει τη συνολική χωρητικότητα των modules που είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους.
- Σύμφωνα με την εξίσωση (10) η ανικανοποίητη ζήτηση ισούται με τη διαφορά της συνολικής ζήτησης σε αυτή τη στάση με τους επιβάτες που όντως εξυπηρετούνται από τα διαθέσιμα modules και όχι από κάποιο επιπλέον.
- Ο περιορισμός (11) εξασφαλίζεται ότι ο χρόνος που φτάνει το όχημα k στον κόμβο j είναι τουλάχιστον όσο ήταν όταν έφτασε στο i λαμβάνοντας υπόψιν και την μεταξύ τους απόσταση και το χρόνο εξυπηρέτησης της στάσης.
- Οι περιορισμοί (12),(13) υποδεικνύουν ότι η μετεπιβίβαση θα γίνει αν οι αφίξεις των οχημάτων είναι εντός του ανεκτού χρονικού περιθωρίου.
- Ο περιορισμός (14) υποδηλώνει ότι αν επιτρέπεται η μετεπιβίβαση το άθροισμα των οχημάτων που εισέρχονται στον κόμβο j από όλους τους κόμβους πρέπει να είναι κάτω από E .
- Ο περιορισμός (15) καθορίζει τον αριθμό των μετακινούμενων που επιβιβάζονται σε κάθε στάση.
- Ο περιορισμός (16) πρόκειται έναν περιορισμό που εξασφαλίζει τη ροή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

4.1. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια η ιδέα της εφαρμογής της βιολογικής αρχής της φυσικής εξέλιξης σε συστήματα τεχνητής νοημοσύνης παρουσίασε εντυπωσιακή ανάπτυξη σε πληθώρα εφαρμογών, σε προβλήματα από διαφορετικές επιστήμες, όπως τη βελτιστοποίηση, τον αυτόματο προγραμματισμό, τη γενετική πληθυσμών κ.α. Τα συστήματα αυτά, ενοποιημένα συνήθως κάτω από τον όρο “Εξελικτικοί αλγόριθμοι” περιλαμβάνουν τρεις μεθοδολογίες, τους γενετικούς αλγορίθμους (“Genetic algorithms”), τις Εξελικτικές Στρατηγικές (“Evolution strategies”) και τον Εξελικτικό Προγραμματισμό. Ωστόσο, οι κύριοι αντιπρόσωποι των “Εξελικτικών αλγόριθμων” για περισσότερο από τρεις δεκαετίες, θεωρούνται οι Γενετικοί αλγόριθμοι.

Η θεωρία Εξέλιξης των ειδών (“Evolution of Species”) διατυπώθηκε από το Δαρβίνο (1859), ο οποίος αναγνώρισε ίχνη εξελικτικών ιδεών σε έργα αρχαίων φιλοσόφων όπως του Αριστοτέλη, του Αναξίμανδρου και του Εμπεδοκλή. Η εισαγωγή όμως των γενετικών αλγορίθμων χρονολογείται το 1958 από τον Friedberg. Ωστόσο, μία νέα ώθηση στο χώρο που οδήγησε και στη ραγδαία ανάπτυξη τους πραγματοποιήθηκε τη δεκαετία του 1960, από τον John Holland και τους συνεργάτες του στο πανεπιστήμιο του Michigan. Στην έρευνα που πραγματοποίησαν προσπάθησαν να εξηγήσουν αυστηρά τις προσαρμοστικές και αναπαραγωγικές διαδικασίες των φυσικών συστημάτων αλλά και το σχεδιασμό ενός λογισμικού τεχνητών συστημάτων που διατηρεί τους πιο σημαντικούς μηχανισμούς τους.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε προβλήματα μεταφορών και ιδίως σε προβλήματα σχεδιασμού δικτύων αστικών συγκοινωνιών (Pioroulou et al. 2019).

4.2. Βασικές έννοιες γενετικού αλγορίθμου

Με τους γενετικούς αλγόριθμους επιτυγχάνεται μία επαναληπτική διαδικασία στην οποία το μέγεθος πληθυσμού των ατόμων (individuals) ή αλλιώς γενότυπων (genotypes), παραμένει σταθερό και αναπαρίσταται από μία σειρά συμβόλων. Κάθε

άτομο ή γενότυπος αποτελείται από χρωμοσώματα (chromosomes), που πρόκειται για συμβολοσειρές (strings), ενός πεπερασμένου αλφάβητου, συνήθως δυαδικών ψηφίων, που κωδικοποιούν μία πιθανή λύση στο δεδομένο χώρο λύσεων του προβλήματος. Ο χώρος αυτός, που περιλαμβάνει όλες τις πιθανές λύσεις αναφέρεται και ως χώρος αναζήτησης.

Τα χρωμοσώματα, αποτελούνται από μικρότερα δομικά μέρη τα γονίδια (genes), που είναι διατεταγμένα σε γραμμική ακολουθία και κωδικοποιούν κάποιο χαρακτηριστικό (δηλαδή κάποια μεταβλητή). Το περιεχόμενο που περιλαμβάνει την κωδικοποιημένη γενετική πληροφορία και προσδίδει κάποια ορατά χαρακτηριστικά στα άτομα, καλείται φαινότυπος (phenotype).

Σε έναν τυπικό γενετικό αλγόριθμο πρώτα δημιουργείται ένας αρχικός πληθυσμός ατόμων (συνήθως τυχαία). Έπειτα, με βάση τη συνάρτηση ποιότητας, η οποία έχει οριστεί από πριν, τα άτομα του πληθυσμού αποκωδικοποιούνται και αξιολογούνται. Τα άτομα αυτά που επιλέγονται αποτελούν το νέο πληθυσμό (την επόμενη γενιά). Πιο συγκεκριμένα, ο πληθυσμός υφίσταται μία προσομοιωμένη γενετική εξέλιξη, όπου όσο καλύτερη είναι η ποιότητα του ατόμου βάσει της αντικειμενικής συνάρτησης (“objective function”), τόσο αυξάνονται και οι πιθανότητες να επιλεγεί ως γονιός. Αντίθετα, άτομα χαμηλής ποιότητας (“κακές λύσεις”) έχουν λιγότερες πιθανότητες να επιλεγθούν και έτσι είναι πιθανό ακόμα και να εξαφανιστούν. Η διαδικασία αυτή όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, επαναλαμβάνεται για αρκετές γενιές μέχρι να παραχθεί ένα γονίδιο, μία λύση στο πρόβλημα η οποία θα αποτελεί τη βέλτιστη, καθώς θα ικανοποιεί όσο το δυνατόν καλύτερα την αντικειμενική συνάρτηση.

4.3. Δομή γενετικού αλγορίθμου

Η δομή ενός γενετικού αλγορίθμου όπως φαίνεται και στην *εικόνα 9*, αποτελείται από 5 βασικά βήματα: Την αρχικοποίηση (initialization), την αποκωδικοποίηση (decoding), τον υπολογισμό ικανότητας ή την αξιολόγηση (Fitness calculation ή evaluation), την αναπαραγωγή (reproduction) η οποία συμπεριλαμβάνει την επιλογή (selection), τη διασταύρωση (Crossover ή mating), τη μετάλλαξη (Mutation), και τέλος την επανάληψη από την αποκωδικοποίηση και μετά έως ότου να

ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού του αλγόριθμου. Στη συνέχεια, αναλύεται το κάθε βήμα ξεχωριστά.

- **Αρχικοποίηση (initialization)**

Η διαδικασία κατά την οποία ορίζεται ο αρχικός πληθυσμός, δηλαδή ο αριθμός των χρωμοσωμάτων, έτσι ώστε στη συνέχεια να λάβουν χώρα οι λειτουργίες του αλγόριθμου καλείται αρχικοποίηση. Η επιλογή του πληθυσμού συνήθως γίνεται τυχαία με τη βοήθεια μίας γεννήτριας τυχαίων δυαδικών ψηφίων, ενώ το μέγεθος του, ορίζεται από το χρήστη ανάλογα με τους πόρους που διαθέτει. Στην περίπτωση αυτή, η αναζήτηση της βέλτιστης λύσης ξεκινά από M διαφορετικά σημεία του χώρου λύσεων, όπου M ο συνολικός αριθμός των χρωμοσωμάτων που αποτελούν τον πληθυσμό. Ωστόσο, με την τυχαία επιλογή συχνά παρατηρείται, ότι ο πληθυσμός δεν καλύπτει ομοιόμορφα το χώρο αναζήτησης με κίνδυνο έτσι να μειωθεί η απόδοση και η αποτελεσματικότητά του. Για να δοθεί επομένως αν χρειάζεται, ένα πλεονέκτημα στην αναζήτηση, επιλέγονται ορισμένες ευρετικές μέθοδοι. Αρκετά σημαντική θεωρείται και η επιλογή του μεγέθους του πληθυσμού καθώς αποτελεί έναν παράγοντα που ορίζεται στην αρχή και δε μεταβάλλεται. Με έναν πολύ μικρό πληθυσμό δεν θα είναι δυνατή η πλήρης εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης, αλλά και με έναν πολύ μεγάλο πληθυσμό η ολοκλήρωση της αναζήτησης θα χρειαστεί πολύ χρόνο. Ενδεικτικά ο βέλτιστος αριθμός χρωμοσωμάτων για απλά προβλήματα είναι περίπου 20-30 ενώ για πιο πολύπλοκα 50-100.

- **Αποκωδικοποίηση (decoding)**

Αφού προκύψει λοιπόν η πρώτη γενιά, ο πληθυσμός πρέπει να αξιολογηθεί μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης αφού πρώτα πραγματοποιηθεί η αποκωδικοποίηση των χαρακτηριστικών. Το σύνολο των κωδικοποιημένων χαρακτηριστικών δηλαδή της γενετικής πληροφορίας ονομάζεται γονότυπος, και πρόκειται για μία συμβολοσειρά με συνήθως δυαδικά ψηφία. Το πως όμως φαίνεται η συμβολοσειρά αυτή στο περιβάλλον, το σύνολο δηλαδή των “ορατών” χαρακτηριστικών της, που καθορίζεται από τα γονίδια, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ονομάζεται φαινότυπος.

- **Υπολογισμός ικανότητας-αξιολόγηση**

Επόμενο βήμα του αλγορίθμου αποτελεί η αξιολόγηση του πληθυσμού, η εκτίμηση δηλαδή της ικανότητάς του για επιβίωση, η οποία αποτελεί και μία θεμελιώδη λειτουργία για τον γενετικό αλγόριθμο. Σε απλά προβλήματα η διαδικασία είναι απλή, καθώς μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης που έχει οριστεί, για κάθε συμβολοσειρά του πληθυσμού, υπολογίζεται η απόδοσή της με τη βοήθεια του τύπου που παρουσιάζεται παρακάτω. Ωστόσο, σε πιο απαιτητικά προβλήματα ο υπολογισμός μπορεί να προκύψει με την εκτέλεση μίας εργαστηριακής προσομοίωσης.

$$P(xi) = \frac{F_i}{F} \quad (1)$$

όπου:

F_i η μέση τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που αντιστοιχεί στο χρωμόσωμα.

F η μέση τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του πληθυσμού F .

- **Αναπαραγωγή**

Στη συνέχεια ακολουθεί η αναπαραγωγή, η οποία αποτελεί και τη σημαντικότερη λειτουργία σε έναν γενετικό αλγόριθμο. Η ολοκλήρωση της αναπαραγωγής, η οποία πρόκειται για μία πιο σύνθετη διαδικασία, πραγματοποιείται μέσα από 3 στάδια, την επιλογή, τη διασταύρωση και τη μετάλλαξη.

- i. Επιλογή**

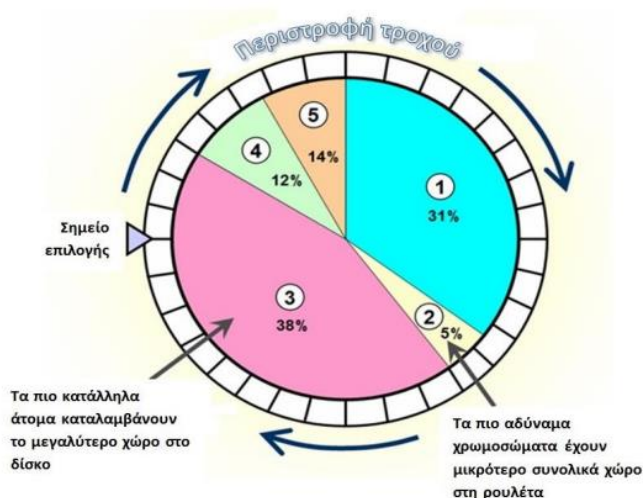
Στο στάδιο της επιλογής πραγματοποιείται ο “νόμος της επιβίωσης του ικανότερου” σύμφωνα με τον οποίο καθορίζονται τα άτομα που θα συμμετέχουν στην επόμενη γενιά κληροδοτώντας παράλληλα μέρος ή και σύνολο των χαρακτηριστικών τους. Στόχο της λειτουργίας αυτής, αποτελεί η εκθετική αύξηση των ικανότερων ατόμων και η επικράτηση τους μέσα από την αναπαραγωγή αρκετών γενεών. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατά τους οποίους μπορεί να πραγματοποιηθεί η επιλογή μέσω του τελεστή αναπαραγωγής.

Ο ευκολότερος από αυτούς θεωρείται εκείνος της ποσοστιαίας επιλογής, με κύριο αντιπρόσωπό της τη μέθοδο του “Τροχού της τύχης” (“Roulette wheel method”). Σύμφωνα με αυτή, ο συνολικός πληθυσμός σχηματίζει το δίσκο της ρουλέτας, όπου σε

κάθε άτομο αντιστοιχεί ένας χώρος που αναλογεί στην καταλληλότητά του. Η ρουλέτα περιστρέφεται τόσες φορές όσες και ο αριθμός των χρωμοσωμάτων και σε κάθε περιστροφή επιλέγεται ο γονέας για τον επόμενο πληθυσμό. Εξαιτίας της περιστροφής της ρουλέτας, κάθε μέλος του πληθυσμού μπορεί να επιλεγεί ως γονέας, και όχι μόνο μία φορά. Αυτή είναι και η βασική της διαφορά συγκριτικά με άλλες μεθόδους. Ωστόσο, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6, άτομα με καλύτερης ποιότητας χαρακτηριστικά καταλαμβάνουν μεγαλύτερο χώρο στο δίσκο και επομένως έχουν περισσότερες πιθανότητες να επιλεγούν.

Μία ακόμα μέθοδος με διάφορες εκδοχές που χρησιμοποιείται συχνά, είναι εκείνη της τυχαίας επιλογής από ένα σύνολο γονέων (“Tournament selection”). Η πιο διαδεδομένη εκδοχή της είναι εκείνη της ν-τυχαίας επιλογής, όπου επιλέγεται τυχαία ένας ν αριθμός χρωμοσωμάτων και ο ικανότερος από αυτούς κρατιέται ως γονέας. Στη συνέχεια, επιλέγονται πάλι από ν χρωμοσώματα του πληθυσμού, εκείνο με την καλύτερη τιμή καταλληλότητας. Στη μέθοδο αυτή, η κάθε επανάληψη είναι ανεξάρτητη από τις προηγούμενες.

Με τη μέθοδο της βαθμονόμησης (“Ranking selection”) η ταξινόμηση των χρωμοσωμάτων πραγματοποιείται με το μέτρο της συνάρτησης ικανότητας. Κατά τη διαδικασία αυτή τα χρωμοσώματα λαμβάνουν έναν αύξοντα αριθμό ο οποίος καθορίζει το πλήθος των αντιγράφων με τα οποία κάθε μέλος θα αντιπροσωπεύεται στον ενδιάμεσο πληθυσμό.



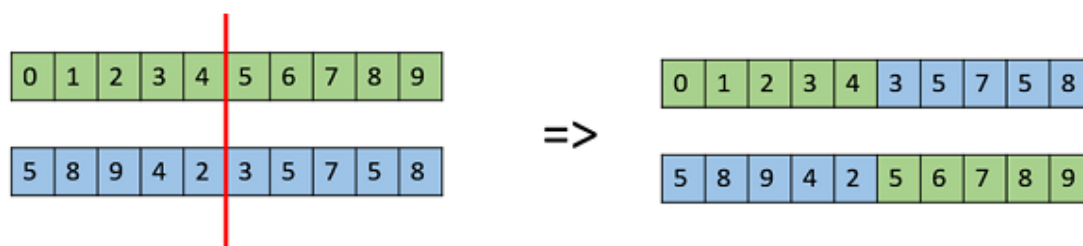
Εικόνα 6: Μέθοδος ποσοστιαίας επιλογής- “τροχός της τύχης”
(Πηγή: Γενετικός αλγόριθμος στο πρόβλημα επιλογής μεταβλητών, Μπαλιτζόγλου Δ.Ελένη, 2020)

ii. Διασταύρωση

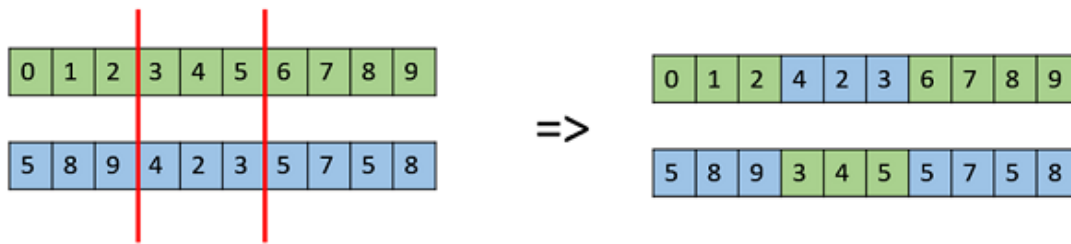
Στο προηγούμενο στάδιο της αναπαραγωγής, με οποιαδήποτε μέθοδο και αν επιλεγεί διαμορφώνεται ένας πληθυσμός. Στη διασταύρωση ο πληθυσμός χωρίζεται σε δύο ομάδες τυχαία και τα δύο αυτά μέλη ανταλλάσσουν γενετικό υλικό. Στόχος αυτής της ανταλλαγής είναι η νέα γενιά που θα προκύψει να αποτελείται από άτομα που διαθέτουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά από τους γονείς τους, επιτυγχάνοντας έτσι συνδυασμούς υψηλής ικανότητας. Η διασταύρωση πραγματοποιείται με πιθανότητα p_c (πιθανότητα διασταύρωσης), η οποία ποικίλλει από πρόγραμμα σε πρόγραμμα και καθορίζεται από το σχεδιαστή του αλγορίθμου.

Μία από τις τεχνικές διασταύρωσης που χρησιμοποιείται ευρέως είναι εκείνη της διασταύρωσης ενός σημείου ("single-point crossover"), όπου σε κάθε ένα από τα χρωμοσώματα γονείς, δημιουργείται μία τομή σε ένα τυχαίο σημείο σχηματίζοντας έτσι δύο τμήματα κεφαλής και δύο ουράς. Με την εναλλαγή των τμημάτων της ουράς προκύπτουν τελικά και τα δύο καινούργια άτομα (εικόνα 7).

Επέκταση της παραπάνω μεθόδου αποτελεί η διασταύρωση πολλαπλών σημείων, όπου πραγματοποιούνται πάλι εναλλαγές, αλλά από N τυχαία σημεία τομής. Η μέθοδος αυτή, παρόλο που παίρνει δείγματα ομοιόμορφα από όλο το μήκος του χρωμοσώματος, συνδυάζοντας έτσι πιο αποτελεσματικά τα καλά χαρακτηριστικά των ατόμων, μπορεί να αποδειχθεί αποδιοργανωτική, καθώς αυξάνεται συνεχώς ο αριθμός των σημείων διασταύρωσης (εικόνα 8).



Εικόνα 7: Διασταύρωση ενός σημείου
(Πηγή: https://www.tutorialspoint.com/genetic_algorithms/genetic_algorithms_crossover.htm)



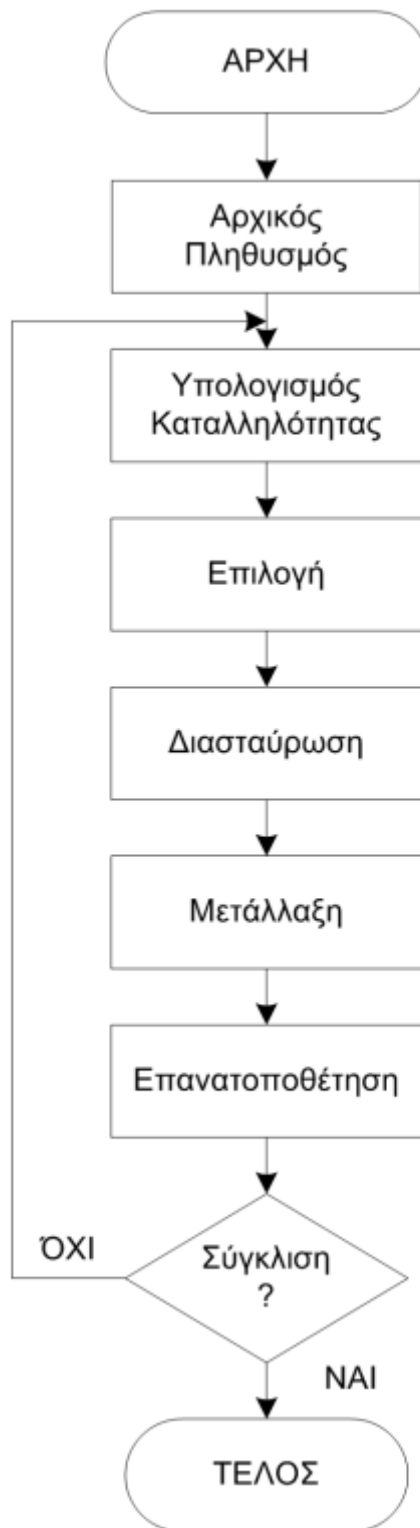
Εικόνα 8: Διασταύρωση πολλαπλών σημείων
 (Πηγή: https://www.tutorialspoint.com/genetic_algorithms/genetic_algorithms_crossover.htm)

iii. Μετάλλαξη

Τελευταίο βήμα της αναπαραγωγής αποτελεί η μετάλλαξη όπου επιλέγεται τυχαία ένα ψηφίο από εκείνα που αντιγράφονται από τον γονέα στον απόγονο και αντιστρέφεται, με μία μικρή πιθανότητα, γνωστή ως πιθανότητα μετάλλαξης. Για να μην εκφυλιστεί ο γενετικός αλγόριθμος σε τυχαίο ψάξιμο η πιθανότητα αυτή πρέπει να είναι της τάξης του 1 προς 1000, δηλαδή μία μετάλλαξη ανά χίλια ψηφία που αντιγράφονται. Παρόλο που δε θεωρείται τόσο σημαντική διαδικασία όσο η διασταύρωση, είναι απαραίτητη, καθώς λειτουργεί ως “ασφαλιστική δικλείδα” όταν χάνονται γενετικές πληροφορίες κατά την επιλογή και τη διασταύρωση. Επιπλέον, με τη διαδικασία αυτή, εισάγεται νέα πληροφορία και χαρακτηριστικά που δεν υπήρχαν πριν στον πληθυσμό. Έτσι, αποφεύγεται ο εγκλωβισμός του σε τοπικά ακρότατα της αντικειμενικής συνάρτησης.

- **Επανάληψη από την αποκωδικοποίηση-κριτήριο τερματισμού**

Αφού έχουν πραγματοποιηθεί όλες οι διαδικασίες, τα παραπάνω βήματα επαναλαμβάνονται κυκλικά από την αποκωδικοποίηση μέχρι τη μετάλλαξη μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού. Πολλές φορές ο αλγόριθμος τερματίζεται όταν το ποσοστό των χρωμοσωμάτων που δεν μεταβάλλεται έχει ξεπεράσει ένα όριο, ή όταν ο μέσος όρος της τιμής καταλληλότητας για όλα τα χρωμοσώματα ενός πληθυσμού και για έναν αριθμό διαδοχικών πληθυσμών δεν βελτιώνεται. Το κριτήριο μπορεί πολλές φορές να αφορά και έναν συγκεκριμένο αριθμό γενεών. Μετά από αυτό όμως πρέπει να εξετάζεται η ποιότητα των καλύτερων μελών.



Εικόνα 9: Δομή γενετικού αλγορίθμου
(Πηγή: https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/3446/1/Chapter_3.pdf)

4.4. Πλεονεκτήματα των γενετικών αλγορίθμων

Στην υποενοότητα αυτή, συγκεντρώνονται τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των γενετικών αλγορίθμων, τα οποία δικαιολογούν και τη χρησιμότητα τους σε πληθώρα εφαρμογών (Γενετικοί Αλγόριθμοι και Εφαρμογές, Λυκοθανάσης 2001).

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των γενετικών αλγορίθμων είναι η μεγάλη αποδοτικότητά τους, καθώς έχει αποδειχθεί ότι μπορούν να επιλύσουν πολύπλοκα προβλήματα σε σύντομο χρονικό διάστημα παρέχοντας αξιόπιστες λύσεις. Συγκριτικά με άλλες μεθόδους, σε προβλήματα με πολλές και δύσκολα προσδιορισμένες λύσεις, οι γενετικοί αλγόριθμοι ανταποκρίνονται καλύτερα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα προβλημάτων που οι γενετικοί αλγόριθμοι αντιμετωπίζουν καλύτερα, αποτελεί η εύρεση ακροτάτων σε συναρτήσεις με μεγάλες διακυμάνσεις.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα τους, είναι ότι συνεργάζονται αποτελεσματικά με τα υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα. Επειδή χρησιμοποιούν συνήθως μόνο πληροφορίες της αντικειμενικής συνάρτησης που πρόκειται να γίνει η βελτιστοποίηση, χωρίς να επηρεάζονται από το σύστημα και τη δομή του, οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να λειτουργήσουν συμπληρωματικά με άλλα μοντέλα χωρίς να απαιτείται η επανασχεδίασή τους.

Επιπλέον, είναι εύκολα επεκτάσιμοι και εξελίξιμοι καθώς δεν αντιστέκονται σε αλλαγές, επεκτάσεις και μετεξελίξεις που σχετίζονται με την κρίση του σχεδιαστή. Παρόλα αυτά, σε κάποιες περιπτώσεις υπόκεινται σε σημαντικές αλλαγές για να βελτιωθεί η απόδοση. Άλλες φορές μάλιστα, επιβάλλονται και παραλλαγές στο βασικό σχήμα για να επιλυθούν διάφορα προβλήματα.

Οι Γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να συμμετέχουν ακόμα και σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους. Σε ορισμένες, πιο σπάνιες περιπτώσεις προβλημάτων, όπου οι άλλες μέθοδοι θεωρούνται πιο αποδοτικές λόγω εξειδίκευσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα υβριδικό σχήμα γενετικού αλγορίθμου με άλλη μέθοδο. Αυτό οφείλεται στην ευελιξία που χαρακτηρίζει τους γενετικούς αλγορίθμους.

Έχει παρατηρηθεί ακόμα, ότι σε σχέση με άλλες μεθόδους οι γενετικοί αλγόριθμοι εφαρμόζονται σε πληθώρα εφαρμογών σε πολλά πεδία. Οι αλγόριθμοι αυτοί, έχουν και περιθώρια επιλογής στα κριτήρια που καθορίζουν, και επιλογή μέσα

στο τεχνικό περιβάλλον, γεγονός που τους προσδίδει ένα συγκριτικό πλεονέκτημα έναντι των άλλων μεθόδων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογών που χρησιμοποιούνται οι αλγόριθμοι αυτοί, είναι προβλήματα στον τομέα της οικονομίας, στο σχεδιασμό μηχανών, στην εκπαίδευση Νευρωνικών Δικτύων, στην επίλυση μαθηματικών εξισώσεων και σε πολλούς ακόμα τομείς.

Οι συναρτήσεις που επεξεργάζονται οι γενετικοί αλγόριθμοι δεν απαιτούν περιορισμούς, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους που είναι απαραίτητο να οριστούν περιορισμοί, παράγωγοι και να μην παρουσιάζονται “θορυβώδεις” συναρτήσεις. Το χαρακτηριστικό τους αυτό, τους καθιστά κατάλληλους για πληθώρα προβλημάτων και εφαρμογών.

Η επιτυχία των γενετικών αλγορίθμων ανεξάρτητα από το εκάστοτε πρόβλημα είναι δεδομένη, εξαιτίας της “επικοινωνίας” του αλγορίθμου με το περιβάλλον του προβλήματος που γίνεται αποκλειστικά μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης. Σε περιπτώσεις που ο γενετικός αλγόριθμος αδυνατεί να αντιμετωπίσει με επιτυχία το πρόβλημα, αίτια αποτελεί η φύση του χώρου που ερευνάται και όχι το πληροφοριακό περιεχόμενο του προβλήματος.

Στους αλγόριθμους αυτούς συναντάται το στοιχείο του παραλληλισμού. Πιο συγκεκριμένα, επειδή από τη φύση τους επεξεργάζονται μεγάλο όγκο πληροφοριών, τους δίνεται η δυνατότητα να καλύψουν αποδοτικά και σε μικρό χρονικό διάστημα μεγάλους χώρους. Αυτό συμβαίνει, γιατί κάθε άτομο θεωρείται αντιπρόσωπος άλλων με αναλογία της τάξεως $O(n^3)$.

Η μέθοδος αυτή σε αντίθεση με άλλες, πραγματοποιεί εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και εκμετάλλευση της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας ταυτόχρονα. Παρόλο που τα δύο αυτά χαρακτηριστικά είναι ανταγωνιστικά μεταξύ τους με τους γενετικούς αλγόριθμους επιτυγχάνεται ο βέλτιστος σχεδιασμός. Αξίζει να σημειωθεί, ότι με το τυχαίο ψάξιμο γίνεται καλή εξερεύνηση του χώρου, αλλά δεν γίνεται σωστή εκμετάλλευση της πληροφορίας (ενώ με το “Hill-climbing” το αντίστροφο). Επομένως, ο συνδυασμός που προσφέρουν οι γενετικοί αλγόριθμοι τους καθιστά ελκυστικούς και αποδοτικούς.

Τέλος, επιδέχονται παράλληλη υλοποίηση, καθώς εκμεταλλεύονται τα πλεονεκτήματά των παράλληλων μηχανών, γεγονός που αυξάνει περαιτέρω την απόδοση τους σε αντίθεση με άλλες μεθόδους.

4.5. Εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου στο μοντέλο

Για την επίλυση του προβλήματος επιλέχθηκε το λογισμικό “EvoInver” της εταιρίας Palisade, το οποίο πρόκειται για ένα πρόσθετο πρόγραμμα του υπολογιστικού λογισμικού Microsoft Excel. Μέσω του λογισμικού αυτού βρέθηκαν οι βέλτιστες λύσεις με χρήση γενετικού αλγορίθμου (κεφάλαιο 5). Στο λογισμικό “EvoInver”, αρχικά εισάγονται τα δεδομένα από τα αντίστοιχα κελιά του υπολογιστικού φύλλου “Excel”, οι περιορισμοί, οι τιμές των παραμέτρων και έπειτα, μετά από αρκετές επαναλήψεις, προκύπτει τελικά η βέλτιστη τιμή.

Το πρώτο στάδιο εφαρμογής του γενετικού αλγορίθμου περιλαμβάνει την αναπαράσταση της λύσης και τον καθορισμό της αντικειμενικής συνάρτησης. Αξίζει να σημειωθεί, ότι το στάδιο αυτό είναι αυτόνομο και ανεξάρτητο από τα επόμενα και πραγματοποιείται πάντα ανεξάρτητα από το πρόβλημα που μελετάται.

- **Αναπαράσταση της λύσης**

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι πιθανές λύσεις του προβλήματος αντιπροσωπεύονται από τα χρωμοσώματα, που στην περίπτωση του προβλήματος που μελετάται, αντιπροσωπεύουν μία ακολουθία κόμβων. Η ακολουθία αυτή κόμβων, δηλώνει τη σειρά των στάσεων που ακολουθεί η κάθε διαδρομή. Οι 15 αυτές στάσεις λεωφορείου εξυπηρετούν τη ζήτηση για 3 διαφορετικές στάσεις μίας γραμμής μετρό. Επειδή για κάθε μία από τις 3 στάσεις μετρό πραγματοποιούνται διαφορετικές διαδρομές, μία πιθανή λύση (πιθανή ομάδα χρωμοσωμάτων) θα μπορούσε να έχει την παρακάτω μορφή.

[5 15 3 6 9 10 4 1 12 2 14 7 8 11 13 R.S.1]

[2 6 10 3 15 14 11 8 12 13 5 1 9 7 4 R.S.2]

[3 7 13 1 9 10 11 2 15 5 8 12 4 6 14 R.S.3]

Τα λεωφορεία θα εξυπηρετήσουν σε κάθε μία από τις 3 περιπτώσεις, όλους τους κόμβους-στάσεις και έπειτα θα καταλήξουν στη στάση μετρό R.S.1, R.S.2, R.S.3 αντίστοιχα. Οι διαδρομές αυτές προκύπτουν από μία ευρετική μέθοδο που κατασκευάστηκε με στόχο το σχεδιασμό των διαδρομών βάση της ζήτησης και εξαντλώντας τη χωρητικότητα των λεωφορείων. Από τις διαδρομές αυτές, στη συνέχεια, βάσει των δύο περιορισμών (χρόνου και μέγιστης χωρητικότητας) θα προκύψουν οι διαδρομές στις οποίες ενδείκνυται η μετάβαση σε άλλο όχημα κατά τη διάρκεια του ταξιδιού (“En-route transfer”).

- **Καθορισμός αντικειμενικής συνάρτησης**

Η αντικειμενική συνάρτηση ή αλλιώς συνάρτηση καταλληλότητας είναι καθοριστική για την βέλτιστη λύση του προβλήματος και αποτελεί το περιβάλλον μέσα στο οποίο εξελίσσεται ο πληθυσμός. Το βασικό αυτό στοιχείο σύνδεσης ενός γενετικού αλγορίθμου με το πρόβλημα, λαμβάνει ως είσοδο μία αποκωδικοποιημένη συμβολοσειρά και επιστρέφει μία τιμή που αναλογεί στην ποιότητα λύσης της συγκεκριμένης συμβολοσειράς. Από αυτή εξαρτάται και η επιβίωση και ο πολλαπλασιασμός του ατόμου.

Η αντικειμενική συνάρτηση όπως αναφέρεται και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος του συστήματος το οποίο περιλαμβάνει το κόστος λειτουργίας, το κόστος που σχετίζεται με το στόλο των αυτόνομων αρθρωτών οχημάτων και την ανικανοποίητη ζήτηση.

$$\min a * \sum_{i \in M} \sum_{j \in M} \sum_{k \in K} \text{dist}_{ijk} * C * X_{ijk} + b * \left(\sum_{j \in I} \sum_{k \in K} X_{0jk} + \sum_{j \in I} \sum_{k \in B} X_{0jk} \right) * F + c * \sum_{i \in M} \sum_{p \in P} U_{ip} * G$$

Στο δεύτερο στάδιο, που παρουσιάζεται στη συνέχεια, πραγματοποιείται ο μεγαλύτερος όγκος εργασιών, όπου στο τέλος, αφού ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού του γενετικού αλγορίθμου παράγεται και η βέλτιστη λύση του προβλήματος. Πρόκειται επομένως για τη δομή του αλγορίθμου, σύμφωνα με το

μοντέλο του προβλήματος που μελετάται, η οποία αποτελείται από τα βήματα που αναλύονται παρακάτω.

- **Αρχικοποίηση πληθυσμού**

Με τη διαδικασία της αρχικοποίησης, όπως προαναφέρθηκε, ορίζεται το μέγεθος του πληθυσμού από το χρήστη. Η επιλογή του μεγέθους είναι σημαντική, καθώς με μικρό πληθυσμό δεν πραγματοποιείται πλήρης εξερεύνηση του χώρου, ενώ με μεγάλο πληθυσμό αμφισβητείται η αποτελεσματικότητα της μεθόδου και αυξάνεται ο χρόνος που απαιτείται για την εύρεση των λύσεων του προβλήματος. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιλέχθηκαν 3 διαφορετικά μεγέθη πληθυσμών, με τιμές 25, 50 και 75 έτσι ώστε να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση συγκριτικά με τη βέλτιστη λύση.

- **. Αποκωδικοποίηση - Υπολογισμός ικανότητας-αξιολόγηση**

Αφού προκύψει λοιπόν η πρώτη γενιά, στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται η αποκωδικοποίηση των χαρακτηριστικών του πληθυσμού. Έπειτα, μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης του μοντέλου που ορίστηκε παραπάνω, υπολογίζεται η απόδοση του κάθε ατόμου βάσει της κωδικοποιημένης γενετικής πληροφορίας..

- **Αναπαραγωγή**

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η αναπαραγωγή είναι μία σύνθετη διαδικασία που συμπεριλαμβάνει την επιλογή, τη διασταύρωση και τη μετάλλαξη.

- i. Επιλογή**

Στον αλγόριθμο που εφαρμόστηκε για το στάδιο της επιλογής επιλέχθηκε η μέθοδος της βαθμονόμησης. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, τα μέλη του πληθυσμού ιεραρχούνται κάθε φορά με βάση το μέτρο της συνάρτησης ικανότητας που αποδίδουν. Η μέθοδος αυτή, σε αντίθεση με τη μέθοδο της αναλογικής επιλογής (που εφαρμόζεται συχνά), επιτρέπει και σε λιγότερο “ικανά” μέλη του πληθυσμού να συμμετέχουν στην επόμενη γενιά στα αρχικά στάδια της διαδικασίας.

i. Διασταύρωση

Στο στάδιο αυτό του γενετικού αλγορίθμου από τα χρωμοσώματα-γονείς με τομές σε τυχαία σημεία προκύπτουν δύο νέα άτομα. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο αντίστοιχο παράδειγμα κόμβων παρακάτω, στον πρώτο απόγονο αντιγράφονται τα γονίδια που περιέχονται στο τμήμα των 2 τομών του πρώτου γονέα, ενώ τα υπόλοιπα γονίδια που δεν εμπεριέχονται στο τμήμα αυτό εμφανίζονται με τη σειρά που παρουσιάζονται στο δεύτερο γονέα.

[5 15 3 6 9 10 4 1 12 2 14 7 8 11 13] -> [6 3 15 11 9 10 4 1 12 2 14 8 13 5 7]
[2 6 10 3 15 14 11 8 12 13 5 1 9 7 4] -> [3 6 9 10 15 14 11 8 12 13 5 4 1 2 7]

ii. Μετάλλαξη

Με τη μετάλλαξη πραγματοποιείται με τυχαίο τρόπο η αλλαγή ενός ή περισσοτέρων γονιδίων ενός χρωμοσώματος, όπως στο παρακάτω παράδειγμα ο κόμβος 6,7. Η πιθανότητα να συμβεί κάτι τέτοιο ισούται με το ρυθμό μετάλλαξης. Η μετάλλαξη εισάγει νέες πιθανές λύσεις ευνοώντας τη διαφορετικότητα του πληθυσμού.

[5 15 3 6 9 10 4 1 12 2 14 7 8 11 13] -> [5 15 3 7 9 10 4 1 12 2 14 6 8 11 13]

• Επανατοποθέτηση και τερματισμός

Αφού πραγματοποιηθούν οι παραπάνω διαδικασίες, τα τελικά χρωμοσώματα που παράγονται επανατοποθετούνται στον παλαιό πληθυσμό δημιουργώντας μία νέα γενιά, έναν πληθυσμό με νέα χρωμοσώματα που έχουν διατηρήσει το μέγεθος του αρχικού πληθυσμού. Έπειτα, τα βήματα του αλγορίθμου επαναλαμβάνονται κυκλικά μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού. Το κριτήριο μπορεί να σχετίζεται με έναν συγκεκριμένο αριθμό γενεών ή να αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό βελτίωσης. Στα πειράματα της παρούσας διπλωματικής παρατηρήθηκε ότι οι τιμές του αλγορίθμου μετά από 20-25 λεπτά σταθεροποιούνται και δεν παρουσιάζουν σημαντικές αλλαγές, επομένως ως κριτήριο τερματισμού ορίστηκαν τα 30 λεπτά.

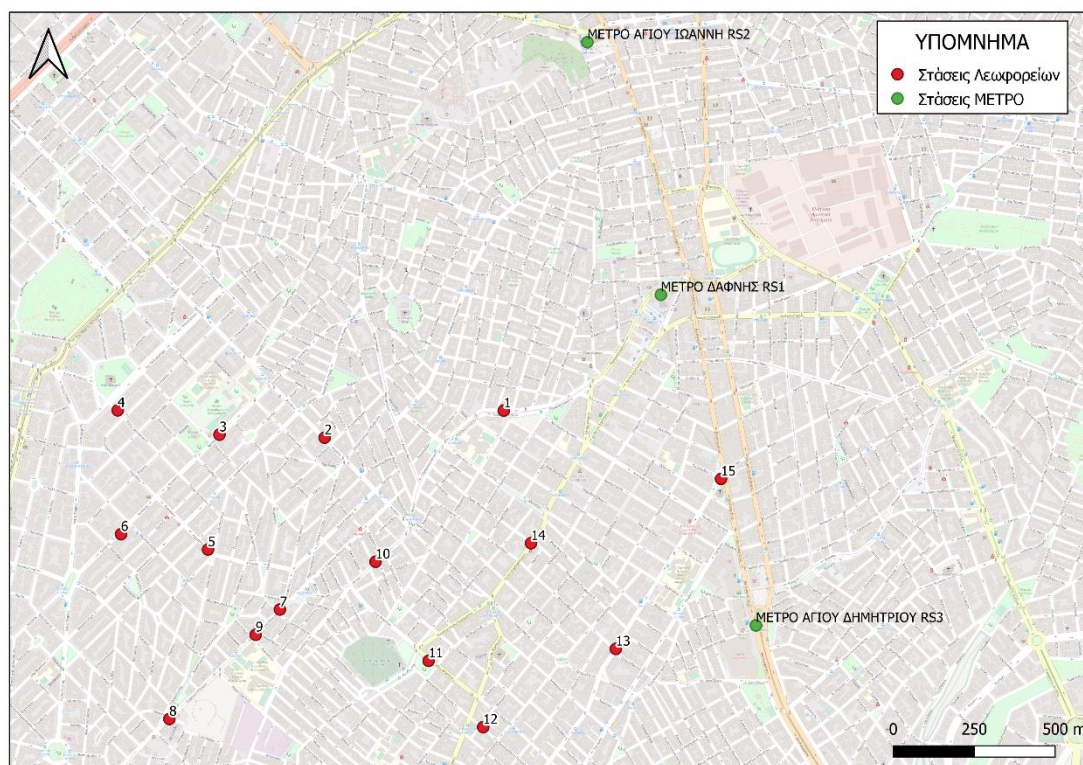
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, πραγματοποιείται η ανάλυση και η σχηματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης, από την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου στο πρόσθετο λογισμικό “EvoIver”. Στην πρώτη υποενότητα, παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης στην οποία θα εφαρμοστεί ο αλγόριθμος, αλλά και τα απαραίτητα δεδομένα για την επίλυση του προβλήματος. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής του γενετικού αλγορίθμου για όλους τους συνδυασμούς παραμέτρων που επιλέχθηκαν (πληθυσμού, διασταύρωσης και μετάλλαξης), η βέλτιστη λύση και η ανάλυση ευαισθησίας της, για 3 παραμέτρους με διάφορες μεταβλητές του προβλήματος.

5.2. Περιοχή μελέτης και δεδομένα

Η περιοχή μελέτης στην οποία πρόκειται να εφαρμοστεί το μοντέλο, βρίσκεται στην Αθήνα, στην Αττική και πιο συγκεκριμένα στο νότιο τομέα Αθηνών. Η έκταση της περιοχής καλύπτεται από το δήμο Δάφνης, Νέας Σμύρνης και Αγίου Δημητρίου. Το δίκτυο διαδρομών που πρόκειται να σχεδιαστεί, θα συνδέει ορισμένες στάσεις λεωφορείου στις περιοχές αυτές, με το σταθμό του μετρό της Δάφνης, του Αγίου Ιωάννη, και του Αγίου Δημητρίου. Στην *εικόνα 10* παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης, όπου με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι στάσεις των λεωφορείων και με πράσινο χρώμα οι στάσεις των σταθμών του μετρό.



Εικόνα 10. Περιοχή μελέτης

Για την επίλυση του προβλήματος σχεδιασμού τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείου με αυτόνομα ηλεκτρικά αρθρωτά λεωφορεία, που πρόκειται να συνδέσουν τις 15 στάσεις λεωφορείου που φαίνονται στην εικόνα 10, με τις 3 στάσεις του μετρό, έγιναν ορισμένες παραδοχές και αξιοποιήθηκαν τα εξής δεδομένα:

- Ζήτηση από κάθε στάση λεωφορείου για κάθε στάση μετρό.
- Αποστάσεις μεταξύ των στάσεων του λεωφορείου, και αποστάσεις από κάθε στάση λεωφορείου προς κάθε στάση μετρό.
- Ταχύτητα των αυτόνομων αρθρωτών οχημάτων (θεωρήθηκε ίση με 30km/h).
- Χρόνοι ταξιδιού που απαιτούνται μεταξύ των στάσεων του λεωφορείου, από κάθε στάση λεωφορείου προς κάθε στάση μετρό, και από το αμαξοστάσιο προς την κάθε στάση λεωφορείου. (όπως προέκυψαν από την ταχύτητα και τις γνωστές αποστάσεις).
- Χρόνοι εξυπηρέτησης σε κάθε στάση (ανάλογα με τη ζήτηση).
- Χωρητικότητα των αυτόνομων αρθρωτών οχημάτων (θεωρήθηκε ίση με 15 θέσεις).

Η ζήτηση από κάθε στάση λεωφορείου για κάθε στάση μετρό προέκυψε βάσει της χωρητικότητας των “modular buses”, για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η “en-route transfer”, δηλαδή η αλλαγή οχήματος κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Η αλλαγή αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί στον κοινό κόμβο-στάση μεταξύ δύο διαδρομών, ενώ στην περίπτωση που δύο διαδρομές έχουν δύο κοινούς κόμβους, η αλλαγή θα πραγματοποιείται στον πρώτο κοινό κόμβο. Με δεδομένη ζήτηση από κάθε στάση λεωφορείου για κάθε στάση μετρό, οι περιορισμοί που τέθηκαν στο κεφάλαιο 3 (ανοχή χρόνου και περιορισμός συνδεδεμένων οχημάτων), ικανοποιούνται για αρκετές διαδρομές. Αφού ικανοποιούνται οι περιορισμοί, και η ζήτηση δεν υπερβαίνει σημαντικά τη χωρητικότητα των οχημάτων (συνδεδεμένα ή μη), δεν δημιουργούνται σημαντικά προβλήματα στη βελτιστοποίηση.

Η ταχύτητα 30km/h δεν επιλέχθηκε αυθαίρετα, αντίθετα τηρεί τις προδιαγραφές των συγκεκριμένων λεωφορείων για τους δρόμους της πόλης σύμφωνα με τα μοντέλα που παρουσιάζονται από την εταιρία NEXT.

Με δεδομένη ταχύτητα 30km/h και τις γνωστές αποστάσεις (σε km) των στάσεων, υπολογίστηκαν οι αντίστοιχοι χρόνοι ταξιδιού που απαιτούνται. Παρόλο που το συνολικό κόστος της αντικειμενικής συνάρτησης προέκυψε από τα χιλιόμετρα που διανύουν τα modules, οι χρόνοι ταξιδιού ήταν απαραίτητοι για να μπορεί να εξεταστεί σε ποιες περιπτώσεις επιτρέπεται η “en-route transfer” (μέγιστη ανοχή χρόνου για να μπορεί να πραγματοποιηθεί η αλλαγή ισούται με 5 λεπτά). Απαραίτητοι ήταν και οι χρόνοι εξυπηρέτησης των επιβατών, καθώς συνυπολογίζονται στον περιορισμό για τη μέγιστη ανοχή χρόνου. Ο χρόνος αυτός, εξαρτάται από τη ζήτηση της συγκεκριμένης στάσης, και συμπεριλαμβάνει τον χρόνο που παραμένει το λεωφορείο στη στάση (4 δευτερόλεπτα) και το χρόνο ($3,8s * \text{ζήτηση}$) που χρειάζεται ο μετακινούμενος για να εισέλθει στο λεωφορείο και να κλείσουν οι πόρτες, (Charisis et al.2018). Ο χρόνος από το αμαξοστάσιο προς κάθε στάση, με βάση κάποιες παραδοχές, θεωρήθηκε σταθερός για όλες τις στάσεις και ίσος με 0,3h. Για όλους τους χρόνους έχουν πραγματοποιηθεί οι αναγωγές στην ώρα.

Η χωρητικότητα για κάθε αυτόνομο αρθρωτό όχημα ισούται με 15, σύμφωνα με τις προδιαγραφές των μοντέλων που παρουσιάζονται από την εταιρία NEXT. Η χωρητικότητα αυτή συμπεριλαμβάνει και καθιστούς και όρθιους μετακινούμενους.

Πίνακας 4. Ζήτηση από τις στάσεις λεωφορείων προς τις στάσεις μετρό

Αρίθμηση στάσεων	ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ/ ΠΡΟΟΡΙΣΜΟΣ	ΜΕΤΡΟ ΔΑΦΝΗΣ (RS1)	ΜΕΤΡΟ ΑΓΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ (RS2)	ΜΕΤΡΟ ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ (RS3)
1	ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ	11	6	13
2	6η ΑΙΓΑΙΟΥ	3	20	3
3	8η ΑΡΤΑΚΗΣ	13	15	11
4	ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ	12	6	8
5	ΛΟΥΤΡΑ	5	6	9
6	10η ΑΡΤΑΚΗΣ	12	10	13
7	ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ	1	2	1
8	ΙΑΣΩΝΟΣ	7	14	4
9	ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ	3	7	15
10	ΑΙΝΟΥ	13	5	13
11	ΝΕΚΤΡΟΤΑΦΕΙΟ	2	6	14
12	ΜΟΥΡΙΚΗ	6	4	6
13	3η ΠΑΠΑΓΟΥ	4	6	2
14	ΣΧΟΛΕΙΟ	4	5	1
15	ΠΑΝΑΓΙΤΣΑ	4	15	2

Πίνακας 5. Χρόνος εξυπηρέτησης κάθε στάσης και χρόνος από αμαξοστάσιο

Στάσεις	Χρόνος εξυπηρέτησης στάσης (h)	Χρόνος από το αμαξοστάσιο (h)
1	0.012722222	0.3
2	0.004277778	0.3
3	0.005333333	0.3
4	0.013777778	0.3
5	0.006388889	0.3
6	0.013777778	0.3
7	0.002166667	0.3
8	0.008500000	0.3
9	0.004277778	0.3
10	0.014833333	0.3
11	0.003222222	0.3
12	0.007444444	0.3
13	0.005333333	0.3
14	0.005333333	0.3
15	0.005333333	0.3

Πίνακας 6. Αποστάσεις μεταξύ των στάσεων του λεωφορείου προς το μετρό Δάφνης

	Distances(km)	ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ	6Η ΑΙΓΑΙΟΥ	8Η ΑΡΤΑΚΗΣ	ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ	ΛΟΥΤΡΑ	10Η ΑΡΤΑΚΗΣ	ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ	ΙΑΣΩΝΟΣ	ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ	ΑΙΝΟΥ	ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ	ΜΟΥΡΙΚΗ	3Η ΠΑΠΑΓΟΥ	ΣΧΟΛΕΙΟ	ΠΑΝΑΓΙΣΤΑ	ΜΕΤΡΟ ΔΑΦΝΗ
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	R.S.
ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ	1	0	0.8	1.7	2.6	1.7	2	1	1.4	1.1	0.6	1.1	1.6	1.8	0.95	1.8	2.2
6Η ΑΙΓΑΙΟΥ	2	1.5	0	0.85	1.8	0.9	1.3	0.8	1.3	0.95	0.45	0.95	1.4	1.9	0.95	1.8	2
8Η ΑΡΤΑΚΗΣ	3	1.8	0.5	0	1.7	0.7	1	1.3	1.2	1.4	0.95	1.4	1.9	2.4	1.4	2.3	2.3
ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ	4	2.6	1.1	0.65	0	0.5	0.65	1.5	1	1.4	1.6	2	2.5	2.8	2.1	3	3
ΛΟΥΤΡΑ	5	2.5	1.5	0.75	1.5	0	0.75	0.4	0.55	0.7	1.2	1.5	1.8	2.3	2	2.9	2.9
10Η ΑΡΤΑΚΗΣ	6	2.5	1	0.5	1.8	0.3	0	1.1	0.9	1	1.4	1.5	2.1	2.6	1.9	2.8	2.8
ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ	7	1.7	0.7	1.1	1.8	0.9	1.1	0	0.45	0.12	0.4	0.65	1.2	1.7	1.1	2	2.1
ΙΑΣΩΝΟΣ	8	2.2	1.2	1.3	1.6	0.7	0.8	0.45	0	0.35	0.85	1.1	1.5	2	1.6	2.6	2.6
ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ	9	1.9	0.8	1.2	1.7	0.85	0.95	0.12	0.35	0	0.5	0.8	1.3	1.8	1.3	2.2	2.3
ΑΙΝΟΥ	10	1.3	0.45	1.3	2.2	1.2	1.4	0.35	0.8	0.45	0	0.45	0.95	1.4	0.75	1.7	1.7
ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ	11	1.5	1	1.8	2.7	1.7	1.9	0.75	1.3	0.9	0.65	0	0.5	1	0.75	1.6	2
ΜΟΥΡΙΚΗ	12	1.4	1.2	2.1	2.8	2	2	1.2	1.4	1.1	0.9	0.55	0	0.95	0.7	1.7	1.9
3Η ΠΑΠΑΓΟΥ	13	1.2	2	2.9	3.8	2.8	3.3	2.2	2.7	2.3	1.8	1.8	1.6	0	1.3	0.65	1.8
ΣΧΟΛΕΙΟ	14	0.7	0.9	1.8	2.7	1.7	2.1	1.1	1.5	1.2	0.75	0.55	1.1	1.2	0	0.9	1.2
ΠΑΝΑΓΙΣΤΑ	15	0.6	1.4	2.3	3.1	2.3	2.6	1.6	2	1.7	1.2	1.1	1.6	1.4	0.55	0	1.1
ΜΕΤΡΟ ΔΑΦΝΗ	R.S.	0.7	1.5	2.3	2.8	2.4	2.7	1.6	2.1	1.8	1.3	1.4	1.9	1.7	0.85	1.4	0

Πίνακας 7. Αποστάσεις μεταξύ των στάσεων του λεωφορείου προς το μετρό Αγίου Ιωάννη

	Distances(km)	ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ	6Η ΑΙΓΑΙΟΥ	8Η ΑΡΤΑΚΗΣ	ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ	ΛΟΥΤΡΑ	10Η ΑΡΤΑΚΗΣ	ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ	ΙΑΣΩΝΟΣ	ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ	ΑΙΝΟΥ	ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ	ΜΟΥΡΙΚΗ	3Η ΠΑΠΑΓΟΥ	ΣΧΟΛΕΙΟ	ΠΑΝΑΓΙΣΤΑ	ΜΕΤΡΟ ΑΓ.ΙΩΑΝΝΗΣ
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	R.S.
ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ	1	0	0.8	1.7	2.6	1.7	2	1	1.4	1.1	0.6	1.1	1.6	1.8	0.95	1.8	3.1
6Η ΑΙΓΑΙΟΥ	2	1.5	0	0.85	1.8	0.9	1.3	0.8	1.3	0.95	0.45	0.95	1.4	1.9	0.95	1.8	2.3
8Η ΑΡΤΑΚΗΣ	3	1.8	0.5	0	1.7	0.7	1	1.3	1.2	1.4	0.95	1.4	1.9	2.4	1.4	2.3	2.2
ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ	4	2.6	1.1	0.65	0	0.5	0.65	1.5	1	1.4	1.6	2	2.5	2.8	2.1	3	2.8
ΛΟΥΤΡΑ	5	2.5	1.5	0.75	1.5	0	0.75	0.4	0.55	0.7	1.2	1.5	1.8	2.3	2	2.9	3
10Η ΑΡΤΑΚΗΣ	6	2.5	1	0.5	1.8	0.3	0	1.1	0.9	1	1.4	1.5	2.1	2.6	1.9	2.8	2.7
ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ	7	1.7	0.7	1.1	1.8	0.9	1.1	0	0.45	0.12	0.4	0.65	1.2	1.7	1.1	2	3
ΙΑΣΩΝΟΣ	8	2.2	1.2	1.3	1.6	0.7	0.8	0.45	0	0.35	0.85	1.1	1.5	2	1.6	2.6	3.4
ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ	9	1.9	0.8	1.2	1.7	0.85	0.95	0.12	0.35	0	0.5	0.8	1.3	1.8	1.3	2.2	3.1
ΑΙΝΟΥ	10	1.3	0.45	1.3	2.2	1.2	1.4	0.35	0.8	0.45	0	0.45	0.95	1.4	0.75	1.7	2.7
ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ	11	1.5	1	1.8	2.7	1.7	1.9	0.75	1.3	0.9	0.65	0	0.5	1	0.75	1.6	3
ΜΟΥΡΙΚΗ	12	1.4	1.2	2.1	2.8	2	2	1.2	1.4	1.1	0.9	0.55	0	0.95	0.7	1.7	2.9
3Η ΠΑΠΑΓΟΥ	13	1.2	2	2.9	3.8	2.8	3.3	2.2	2.7	2.3	1.8	1.8	1.6	0	1.3	0.65	2.8
ΣΧΟΛΕΙΟ	14	0.7	0.9	1.8	2.7	1.7	2.1	1.1	1.5	1.2	0.75	0.55	1.1	1.2	0	0.9	2.2
ΠΑΝΑΓΙΣΤΑ	15	0.6	1.4	2.3	3.1	2.3	2.6	1.6	2	1.7	1.2	1.1	1.6	1.4	0.55	0	2.1
ΜΕΤΡΟ ΑΓ.ΙΩΑΝΝΗΣ	R.S.	1.7	2	2.8	2.5	2.8	3.3	2.6	3.1	2.8	2.3	2.4	2.9	2.4	1.9	2	0

Πίνακας 8. Αποστάσεις μεταξύ των στάσεων του λεωφορείου προς το μετρό Αγίου Δημητρίου

	Distances(km)	ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ	6Η ΑΙΓΑΙΟΥ	8Η ΑΡΤΑΚΗΣ	ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ	ΛΟΥΤΡΑ	10Η ΑΡΤΑΚΗΣ	ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ	ΙΑΣΩΝΟΣ	ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ	ΑΙΝΟΥ	ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ	ΜΟΥΡΙΚΗ	3Η ΠΑΠΑΓΟΥ	ΣΧΟΛΕΙΟ	ΠΑΝΑΓΙΣΤΑ	ΜΕΤΡΟ ΑΓ.ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	R.S.	
ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ	1	0	0.8	1.7	2.6	1.7	2	1	1.4	1.1	0.6	1.1	1.6	1.8	0.95	1.8	2.4	
6Η ΑΙΓΑΙΟΥ	2	1.5	0	0.85	1.8	0.9	1.3	0.8	1.3	0.95	0.45	0.95	1.4	1.9	0.95	1.8	2.1	
8Η ΑΡΤΑΚΗΣ	3	1.8	0.5	0	1.7	0.7	1	1.3	1.2	1.4	0.95	1.4	1.9	2.4	1.4	2.3	2.6	
ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ	4	2.6	1.1	0.65	0	0.5	0.65	1.5	1	1.4	1.6	2	2.5	2.8	2.1	3	3.2	
ΛΟΥΤΡΑ	5	2.5	1.5	0.75	1.5	0	0.75	0.4	0.55	0.7	1.2	1.5	1.8	2.3	2	2.9	3.1	
10Η ΑΡΤΑΚΗΣ	6	2.5	1	0.5	1.8	0.3	0	1.1	0.9	1	1.4	1.5	2.1	2.6	1.9	2.8	3.1	
ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ	7	1.7	0.7	1.1	1.8	0.9	1.1	0	0.45	0.12	0.4	0.65	1.2	1.7	1.1	2	2.3	
ΙΑΣΩΝΟΣ	8	2.2	1.2	1.3	1.6	0.7	0.8	0.45	0	0.35	0.85	1.1	1.5	2	1.6	2.6	2.8	
ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ	9	1.9	0.8	1.2	1.7	0.85	0.95	0.12	0.35	0	0.5	0.8	1.3	1.8	1.3	2.2	2.4	
ΑΙΝΟΥ	10	1.3	0.45	1.3	2.2	1.2	1.4	0.35	0.8	0.45	0	0.45	0.95	1.4	0.75	1.7	1.9	
ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ	11	1.5	1	1.8	2.7	1.7	1.9	0.75	1.3	0.9	0.65	0	0.5	1	0.75	1.6	2.2	
ΜΟΥΡΙΚΗ	12	1.4	1.2	2.1	2.8	2	2	1.2	1.4	1.1	0.9	0.55	0	0.95	0.7	1.7	2.1	
3Η ΠΑΠΑΓΟΥ	13	1.2	2	2.9	3.8	2.8	3.3	2.2	2.7	2.3	1.8	1.8	1.6	0	1.3	0.65	1.1	
ΣΧΟΛΕΙΟ	14	0.7	0.9	1.8	2.7	1.7	2.1	1.1	1.5	1.2	0.75	0.55	1.1	1.2	0	0.9	1.3	
ΠΑΝΑΓΙΣΤΑ	15	0.6	1.4	2.3	3.1	2.3	2.6	1.6	2	1.7	1.2	1.1	1.6	1.4	0.55	0	1.1	
ΜΕΤΡΟ ΑΓ.ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ	R.S.		1.2	1.8	2.7	3.6	2.7	3	2	2.4	2.1	1.6	1.5	1.2	0.7	1.2	0.65	0

Πίνακας 9. Χρόνοι ταξιδιού που απαιτούνται μεταξύ των στάσεων του λεωφορείου και προς το μετρό της Δάφνης

	TravelTimes(h)	ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ	6Η ΑΙΓΑΙΟΥ	8Η ΑΡΤΑΚΗΣ	ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ	ΛΟΥΤΡΑ	10Η ΑΡΤΑΚΗΣ	ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ	ΙΑΣΩΝΟΣ	ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ	ΑΙΝΟΥ	ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ	ΜΟΥΡΙΚΗ	3Η ΠΑΠΑΓΟΥ	ΣΧΟΛΕΙΟ	ΠΑΝΑΓΙΣΤΑ	ΜΕΤΡΟ ΔΑΦΝΗ	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	R.S.	
ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ	1	0	0.0267	0.0567	0.0867	0.0567	0.0667	0.0333	0.0467	0.0367	0.0200	0.0367	0.0533	0.0600	0.0317	0.0600	0.0733	
6Η ΑΙΓΑΙΟΥ	2	0.0500	0	0.0283	0.0600	0.0300	0.0433	0.0267	0.0433	0.0317	0.0150	0.0317	0.0467	0.0633	0.0317	0.0600	0.0667	
8Η ΑΡΤΑΚΗΣ	3	0.0600	0.0167	0	0.0567	0.0233	0.0333	0.0433	0.0400	0.0467	0.0317	0.0467	0.0633	0.0800	0.0467	0.0767	0.0767	
ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ	4	0.0867	0.0367	0.0217	0	0.0167	0.0217	0.0500	0.0333	0.0467	0.0533	0.0667	0.0833	0.0933	0.0700	0.1000	0.1000	
ΛΟΥΤΡΑ	5	0.0833	0.0500	0.0250	0.0500	0	0.0250	0.0133	0.0183	0.0233	0.0400	0.0500	0.0600	0.0767	0.0667	0.0967	0.0967	
10Η ΑΡΤΑΚΗΣ	6	0.0833	0.0333	0.0167	0.0600	0.0100	0	0.0367	0.0300	0.0333	0.0467	0.0500	0.0700	0.0867	0.0633	0.0933	0.0933	
ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ	7	0.0567	0.0233	0.0367	0.0600	0.0300	0.0367	0	0.0150	0.0040	0.0133	0.0217	0.0400	0.0567	0.0367	0.0667	0.0700	
ΙΑΣΩΝΟΣ	8	0.0733	0.0400	0.0433	0.0533	0.0233	0.0267	0.0150	0	0.0117	0.0283	0.0367	0.0500	0.0667	0.0533	0.0867	0.0867	
ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ	9	0.0633	0.0267	0.0400	0.0567	0.0283	0.0317	0.0040	0.0117	0	0.0167	0.0267	0.0433	0.0600	0.0433	0.0733	0.0767	
ΑΙΝΟΥ	10	0.0433	0.0150	0.0433	0.0733	0.0400	0.0467	0.0117	0.0267	0.0150	0	0.0150	0.0317	0.0467	0.0250	0.0567	0.0567	
ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ	11	0.0500	0.0333	0.0600	0.0900	0.0567	0.0633	0.0250	0.0433	0.0300	0.0217	0	0.0167	0.0333	0.0250	0.0533	0.0667	
ΜΟΥΡΙΚΗ	12	0.0467	0.0400	0.0700	0.0933	0.0667	0.0667	0.0400	0.0467	0.0367	0.0300	0.0183	0	0.0317	0.0233	0.0567	0.0633	
3Η ΠΑΠΑΓΟΥ	13	0.0400	0.0667	0.0967	0.1267	0.0933	0.1100	0.0733	0.0900	0.0767	0.0600	0.0600	0.0533	0	0.0433	0.0217	0.0600	
ΣΧΟΛΕΙΟ	14	0.0233	0.0300	0.0600	0.0900	0.0567	0.0700	0.0367	0.0500	0.0400	0.0250	0.0183	0.0367	0.0400	0	0.0300	0.0400	
ΠΑΝΑΓΙΣΤΑ	15	0.0200	0.0467	0.0767	0.1033	0.0767	0.0867	0.0533	0.0667	0.0567	0.0400	0.0367	0.0533	0.0467	0.0183	0	0.0367	
ΜΕΤΡΟ ΔΑΦΝΗ	R.S.		0.0233	0.0500	0.0767	0.0933	0.0800	0.0900	0.0533	0.0700	0.0600	0.0433	0.0467	0.0633	0.0567	0.0283	0.0467	0

Πίνακας 10. Χρόνοι ταξιδιού που απαιτούνται μεταξύ των στάσεων του λεωφορείου και προς το μετρό του Αγίου Ιωάννη.

	TravelTimes(h)	ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ	6Η ΑΙΓΑΙΟΥ	8Η ΑΡΤΑΚΗΣ	ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ	ΛΟΥΤΡΑ	10Η ΑΡΤΑΚΗΣ	ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ	ΙΑΣΩΝΟΣ	ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ	ΑΙΝΟΥ	ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ	ΜΟΥΡΙΚΗ	3Η ΠΑΠΑΓΟΥ	ΣΧΟΛΕΙΟ	ΠΑΝΑΓΙΣΤΑ	ΜΕΤΡΟ ΑΓ.ΙΩΑΝΝΗΣ
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	R.S.
ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ	1	0	0.0267	0.0567	0.0867	0.0567	0.0667	0.0333	0.0467	0.0367	0.0200	0.0367	0.0533	0.0600	0.0317	0.0600	0.1033
6Η ΑΙΓΑΙΟΥ	2	0.0500	0	0.0283	0.0600	0.0300	0.0433	0.0267	0.0433	0.0317	0.0150	0.0317	0.0467	0.0633	0.0317	0.0600	0.0767
8Η ΑΡΤΑΚΗΣ	3	0.0600	0.0167	0	0.0567	0.0233	0.0333	0.0433	0.0400	0.0467	0.0317	0.0467	0.0633	0.0800	0.0467	0.0767	0.0733
ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ	4	0.0867	0.0367	0.0217	0	0.0167	0.0217	0.0500	0.0333	0.0467	0.0533	0.0667	0.0833	0.0933	0.0700	0.1000	0.0933
ΛΟΥΤΡΑ	5	0.0833	0.0500	0.0250	0.0500	0	0.0250	0.0133	0.0183	0.0233	0.0400	0.0500	0.0600	0.0767	0.0667	0.0967	0.1000
10Η ΑΡΤΑΚΗΣ	6	0.0833	0.0333	0.0167	0.0600	0.0100	0	0.0367	0.0300	0.0333	0.0467	0.0500	0.0700	0.0867	0.0633	0.0933	0.0900
ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ	7	0.0567	0.0233	0.0367	0.0600	0.0300	0.0367	0	0.0150	0.0040	0.0133	0.0217	0.0400	0.0567	0.0367	0.0667	0.1000
ΙΑΣΩΝΟΣ	8	0.0733	0.0400	0.0433	0.0533	0.0233	0.0267	0.0150	0	0.0117	0.0283	0.0367	0.0500	0.0667	0.0533	0.0867	0.1133
ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ	9	0.0633	0.0267	0.0400	0.0567	0.0283	0.0317	0.0040	0.0117	0	0.0167	0.0267	0.0433	0.0600	0.0433	0.0733	0.1033
ΑΙΝΟΥ	10	0.0433	0.0150	0.0433	0.0733	0.0400	0.0467	0.0117	0.0267	0.0150	0	0.0150	0.0317	0.0467	0.0250	0.0567	0.0900
ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ	11	0.0500	0.0333	0.0600	0.0900	0.0567	0.0633	0.0250	0.0433	0.0300	0.0217	0	0.0167	0.0333	0.0250	0.0533	0.1000
ΜΟΥΡΙΚΗ	12	0.0467	0.0400	0.0700	0.0933	0.0667	0.0667	0.0400	0.0467	0.0367	0.0300	0.0183	0	0.0317	0.0233	0.0567	0.0967
3Η ΠΑΠΑΓΟΥ	13	0.0400	0.0667	0.0967	0.1267	0.0933	0.1100	0.0733	0.0900	0.0767	0.0600	0.0600	0.0533	0	0.0433	0.0217	0.0933
ΣΧΟΛΕΙΟ	14	0.0233	0.0300	0.0600	0.0900	0.0567	0.0700	0.0367	0.0500	0.0400	0.0250	0.0183	0.0367	0.0400	0	0.0300	0.0733
ΠΑΝΑΓΙΣΤΑ	15	0.0200	0.0467	0.0767	0.1033	0.0767	0.0867	0.0533	0.0667	0.0567	0.0400	0.0367	0.0533	0.0467	0.0183	0	0.0700
ΜΕΤΡΟ ΑΓ.ΙΩΑΝΝΗΣ	R.S.	0.0567	0.0667	0.0933	0.0833	0.0933	0.1100	0.0867	0.1033	0.0933	0.0767	0.0800	0.0967	0.0800	0.0633	0.0667	0

Πίνακας 11. Χρόνοι ταξιδιού που απαιτούνται μεταξύ των στάσεων του λεωφορείου και προς το μετρό του Αγίου Δημητρίου.

	TravelTimes(h)	ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ	6Η ΑΙΓΑΙΟΥ	8Η ΑΡΤΑΚΗΣ	ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ	ΛΟΥΤΡΑ	10Η ΑΡΤΑΚΗΣ	ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ	ΙΑΣΩΝΟΣ	ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ	ΑΙΝΟΥ	ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ	ΜΟΥΡΙΚΗ	3Η ΠΑΠΑΓΟΥ	ΣΧΟΛΕΙΟ	ΠΑΝΑΓΙΣΤΑ	ΜΕΤΡΟ ΑΓ.ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	R.S.
ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ	1	0	0.0267	0.0567	0.0867	0.0567	0.0667	0.0333	0.0467	0.0367	0.0200	0.0367	0.0533	0.0600	0.0317	0.0600	0.0800
6Η ΑΙΓΑΙΟΥ	2	0.0500	0	0.0283	0.0600	0.0300	0.0433	0.0267	0.0433	0.0317	0.0150	0.0317	0.0467	0.0633	0.0317	0.0600	0.0700
8Η ΑΡΤΑΚΗΣ	3	0.0600	0.0167	0	0.0567	0.0233	0.0333	0.0433	0.0400	0.0467	0.0317	0.0467	0.0633	0.0800	0.0467	0.0767	0.0867
ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ	4	0.0867	0.0367	0.0217	0	0.0167	0.0217	0.0500	0.0333	0.0467	0.0533	0.0667	0.0833	0.0933	0.0700	0.1000	0.1067
ΛΟΥΤΡΑ	5	0.0833	0.0500	0.0250	0.0500	0	0.0250	0.0133	0.0183	0.0233	0.0400	0.0500	0.0600	0.0767	0.0667	0.0967	0.1033
10Η ΑΡΤΑΚΗΣ	6	0.0833	0.0333	0.0167	0.0600	0.0100	0	0.0367	0.0300	0.0333	0.0467	0.0500	0.0700	0.0867	0.0633	0.0933	0.1033
ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ	7	0.0567	0.0233	0.0367	0.0600	0.0300	0.0367	0	0.0150	0.0040	0.0133	0.0217	0.0400	0.0567	0.0367	0.0667	0.0767
ΙΑΣΩΝΟΣ	8	0.0733	0.0400	0.0433	0.0533	0.0233	0.0267	0.0150	0	0.0117	0.0283	0.0367	0.0500	0.0667	0.0533	0.0867	0.0933
ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ	9	0.0633	0.0267	0.0400	0.0567	0.0283	0.0317	0.0040	0.0117	0	0.0167	0.0267	0.0433	0.0600	0.0433	0.0733	0.0800
ΑΙΝΟΥ	10	0.0433	0.0150	0.0433	0.0733	0.0400	0.0467	0.0117	0.0267	0.0150	0	0.0150	0.0317	0.0467	0.0250	0.0567	0.0633
ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ	11	0.0500	0.0333	0.0600	0.0900	0.0567	0.0633	0.0250	0.0433	0.0300	0.0217	0	0.0167	0.0333	0.0250	0.0533	0.0733
ΜΟΥΡΙΚΗ	12	0.0467	0.0400	0.0700	0.0933	0.0667	0.0667	0.0400	0.0467	0.0367	0.0300	0.0183	0	0.0317	0.0233	0.0567	0.0700
3Η ΠΑΠΑΓΟΥ	13	0.0400	0.0667	0.0967	0.1267	0.0933	0.1100	0.0733	0.0900	0.0767	0.0600	0.0600	0.0533	0	0.0433	0.0217	0.0367
ΣΧΟΛΕΙΟ	14	0.0233	0.0300	0.0600	0.0900	0.0567	0.0700	0.0367	0.0500	0.0400	0.0250	0.0183	0.0367	0.0400	0	0.0300	0.0433
ΠΑΝΑΓΙΣΤΑ	15	0.0200	0.0467	0.0767	0.1033	0.0767	0.0867	0.0533	0.0667	0.0567	0.0400	0.0367	0.0533	0.0467	0.0183	0	0.0367
ΜΕΤΡΟ ΑΓ.ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ	R.S.	0.0400	0.0600	0.0900	0.1200	0.0900	0.1000	0.0667	0.0800	0.0700	0.0533	0.0500	0.0400	0.0233	0.0400	0.0217	0

5.3. Αποτελέσματα αλγορίθμου

5.3.1. Εισαγωγή

Το μαθηματικό μοντέλο που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3, το οποίο επιλύει το πρόβλημα του σχεδιασμού δικτύου τροφοδοτικών γραμμών με τη χρήση των “modular buses”, αρχικά υλοποιήθηκε στο περιβάλλον της “Visual Basic for Applications” (VBA), στο λογισμικό “Microsoft Excel”. Μέσω της “Visual basic”, προγραμματίστηκαν οι ειδικές συναρτήσεις για να προσδιοριστούν οι απαραίτητες μεταβλητές. Ωστόσο, στο περιβάλλον της “Visual basic”, μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο μία αρχική εκτίμηση του αποτελέσματος. Η εύρεση της βέλτιστης λύσης, που παρουσιάζεται σε επόμενη υποενότητα, υλοποιήθηκε στο λογισμικό “Evolver”, μέσα από δοκιμές για διαφορετικές τιμές του πληθυσμού, του συντελεστή διασταύρωσης και του συντελεστή μετάλλαξης.

5.3.2. Περιβάλλον της “Visual Basic” / “Visual Basic for Applications”

Η “Visual basic” είναι μία γλώσσα προγραμματισμού τρίτης γενιάς η οποία αποτελεί μετεξέλιξη της παλιότερης έκδοσης της, γνωστή ως GW Basic. Πρόκειται για ένα μέλος της ομάδας προγραμμάτων του Microsoft Visual studio και αποτελεί την πιο διαδεδομένη αντικειμενοστραφή γλώσσα προγραμματισμού σε περιβάλλον MS-Windows. Η “Visual Basic” θεωρείται μία σχετικά εύκολη γλώσσα στην εκμάθηση, και έτσι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί από όλους τους χρήστες και όχι μόνο από επαγγελματίες. Είναι μία πλούσια γλώσσα που διαθέτει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης λογισμικού, που επιτρέπει τη γραφική σύνθεση διαφόρων στοιχείων, που αποτελούν μέσο επικοινωνίας του τελικού προγράμματος.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιήθηκε η “Visual Basic for Applications” (VBA) η οποία βασίζεται στη “Visual Basic”, και χρησιμοποιεί παρόμοια χαρακτηριστικά και σχεδιαστικό περιβάλλον. Ωστόσο, θεωρείται ότι αποτελεί μία εξειδικευμένη μορφή της, η οποία δεν παρέχεται ως ξεχωριστό λογισμικό αλλά ενσωματώνεται σε άλλα προγράμματα. Ένα βασικό χαρακτηριστικό της, είναι η καθιέρωση της χρήσης της από τη Microsoft ως κατ’ εξοχήν γλώσσα επικοινωνίας μεταξύ διαφορετικών προγραμμάτων και εφαρμογών όπως το “Excel”, το “Word”, το “Autocad” κ.α. Ο κυριότερος λόγος που επιλέχθηκε η συγκεκριμένη γλώσσα

προγραμματισμού, είναι ότι δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να κατασκευάζει συναρτήσεις που δεν υπάρχουν εκ των προτέρων. Για την κατασκευή των συναρτήσεων αρχικά ήταν απαραίτητο να οριστεί το όνομα της συνάρτησης, στη συνέχεια οι μεταβλητές εισόδου, αφού προσδιοριζόταν φυσικά το είδος τους (integer, single, double κλπ.) στην αρχή της κάθε υπορουτίνας, και έπειτα ο κώδικας της συνάρτησης ο οποίος δηλώνει τις ενέργειες που θα εκτελεί η συνάρτηση κάθε φορά που θα καλείται.

5.3.3. Υλοποίηση του μοντέλου στη “VBA”

Για τις ανάγκες του προβλήματος διαμορφώθηκαν 7 υπορουτίνες (ο συνολικός κώδικας με όλες τις υπορουτίνες που περιγράφονται επισυνάπτεται στο παράρτημα):

- **Init_pop_gen:** Η υπορουτίνα αυτή κατατάσσει με τυχαία σειρά τους 15 κόμβους των στάσεων του λεωφορείου.
- **Getroutes:** Με τον κώδικα που καλείται σε αυτή τη ρουτίνα διαμορφώνονται οι αρχικές-βασικές διαδρομές από τις 15 στάσεις λεωφορείου προς τις 3 στάσεις μετρό. Δημιουργούνται δηλαδή 3 ξεχωριστά “πακέτα” διαδρομών για την κάθε μία στάση του μετρό. Προκειμένου να βρεθούν οι διαδρομές αυτές, στο πρώτο βήμα ο αλγόριθμος ξεκινά με τον πρώτο κόμβο (πρώτο γονίδιο του χρωμοσώματος) και για τον κόμβο αυτόν και για κάθε επόμενο, υπολογίζει το άθροισμα των επιβατών με αφετηρία τον εκάστοτε κόμβο και προορισμό την κάθε στάση του μετρό. Αν οι περιορισμοί χωρητικότητας του λεωφορείου δεν παραβιάζονται προστίθεται ο επόμενος κόμβος στη διαδρομή. Αν οι επιβάτες είναι περισσότεροι από τη διαθέσιμη χωρητικότητα ο αλγόριθμος επιστρέφει στο πρώτο βήμα και θέτει τον επόμενο κόμβο ως πρώτη στάση της επόμενης διαδρομής. Η διαδικασία τερματίζεται όταν όλοι οι κόμβοι συμπεριληφθούν σε κάποια διαδρομή.
- **Matching nodes:** Αφού έχουν υπολογιστεί οι αρχικές-βασικές διαδρομές και για τις 3 στάσεις του μετρό ξεκινά μία διαδικασία προκειμένου να εντοπιστούν οι διαδρομές στις οποίες θα μπορεί να πραγματοποιηθεί η “en-route transfer”. Στην υπορουτίνα αυτή, εντοπίζονται οι κοινοί κόμβοι μεταξύ των αρχικών διαδρομών σε συνδυασμό ανά δύο (αρχικές διαδρομές στάσης μετρό 1-στάσης μετρό 2 κλπ.). Επειδή και στις 3 αρχικές διαδρομές συμπεριλαμβάνονται όλοι

οι κόμβοι η υπορουτίνα αυτή πρακτικά, αντιστοιχίζει τις διαδρομές (που απευθύνονται σε διαφορετική ζήτηση) για κάθε συνδυασμό, που έχουν κοινό κόμβο. Παράγονται δηλαδή συνολικά 3 συνδυασμοί διαδρομών, με 15 κοινούς κόμβους και με 30 διαδρομές ο καθένας.

- **Nodes_total_time:** Η ρουτίνα αυτή εντοπίζει τους αρχικούς και τους κοινούς κόμβους των δύο διαδρομών που πρόκειται να ενωθούν και υπολογίζει το χρόνο που απαιτείται για να διανύσει ένα αρθρωτό αυτόνομο όχημα την απόσταση από τον αρχικό μέχρι τον κοινό κόμβο για κάθε διαδρομή. Αν η χρονική διαφορά των δύο διαδρομών που πρόκειται να ενωθούν για να διανύσουν την απόσταση αυτή, είναι μικρότερη από 0.8h τότε ικανοποιείται το πρώτο κριτήριο για να πραγματοποιηθεί η “en-route transfer” και οι διαδρομές αυτές κρατιούνται στη μνήμη.
- **Total_cost_V12/ Total_cost_V13/ Total_cost_V23:** Για τις διαδρομές που ικανοποιείται το κριτήριο του χρόνου για μετεπιβίβαση από ένα όχημα σε ένα άλλο, ελέγχεται το κριτήριο των συνδεδεμένων οχημάτων στον κοινό κόμβο. Όπως επισημάνθηκε και στο κεφάλαιο 3, ο επιτρεπόμενος αριθμός συνδεδεμένων “modules” στον κοινό κόμβο για να μετεπιβίβαση είναι 3. Για τις διαδρομές που ικανοποιείται και αυτό το κριτήριο υπολογίζεται το συνολικό κόστος, η αντικειμενική συνάρτηση δηλαδή του προβλήματος. Ο ελάχιστος αριθμός απαιτούμενων οχημάτων σε κάθε διαδρομή ισούται με 2. Για κάθε κόμβο διαδρομής ο αλγόριθμος υπολογίζει το άθροισμα των επιβατών που επιβιβάζονται προκειμένου να ελεγχθεί το κριτήριο της χωρητικότητας. Από τον αρχικό μέχρι τον κοινό κόμβο, αν η ζήτηση της κάθε στάσης (και για τους δύο σταθμούς του μετρό) μαζί με τους επιβάτες που έχουν αποβιβαστεί ξεπερνά τη χωρητικότητα, ο αλγόριθμος υπολογίζει τους μετακινούμενους που μένουν ανικανοποίητοι. Για τους ανικανοποίητους μετακινούμενους προστίθεται στον αρχικό κόμβο ένα επιπλέον όχημα για να τους εξυπηρετήσει. Ωστόσο, αν και για τις δύο διαδρομές απαιτούνται δύο οχήματα στον αρχικό κόμβο για να ικανοποιηθεί η ζήτηση, οι διαδρομές αυτές απορρίπτονται, καθώς στον κοινό κόμβο σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να συνδεθούν 4 οχήματα. Τα 4 οχήματα παραβιάζουν τον περιορισμό και επομένως οι διαδρομές αυτές δεν συνυπολογίζονται. Για τις διαδρομές που ικανοποιούν τον περιορισμό ο αλγόριθμος στη συνέχεια υπολογίζει στον κοινό κόμβο πόσα οχήματα θα

συνδεθούν σε κάθε κατεύθυνση. Αν στον κοινό κόμβο ή στους επόμενους η ζήτηση ξεπερνά τις κενές θέσεις των λεωφορείων, δηλαδή παρουσιάζονται ανικανοποίητοι μετακινούμενοι, προστίθεται ένα επιπλέον όχημα στον κοινό κόμβο, το οποίο συνδέεται με τα υπόλοιπα, στην κατεύθυνση που χρειάζεται. Ο περιορισμός συνδεδεμένων οχημάτων, παύει να ισχύει αφού έχει ολοκληρωθεί η πιθανή μετάβαση των μετακινούμενων σε άλλο όχημα. Για τις διαδρομές που ικανοποιείται και αυτό το κριτήριο υπολογίζεται το συνολικό κόστος του συστήματος το οποίο περιλαμβάνει το κόστος που σχετίζεται με τα συνολικά χιλιόμετρα που διανύει το κάθε όχημα για όλες τις διαδρομές (κόστος λειτουργίας συστήματος), το κόστος για την αγορά όλου του διαθέσιμου στόλου και το κόστος που σχετίζεται με την ανικανοποίητη ζήτηση.

5.4. Βελτιστοποίηση

5.4.1. Εισαγωγή

Η βελτιστοποίηση ορίζεται ως η διαδικασία εύρεσης της καλύτερης λύσης ενός προβλήματος που περιλαμβάνει πολλές πιθανές λύσεις. Τα προβλήματα αυτά αντιμετωπίζονται ως προβλήματα ελαχιστοποίησης ή μεγιστοποίησης μίας συνάρτησης ή πολλών μεταβλητών. Τα στάδια που πρέπει να περιλαμβάνει η αντιμετώπιση κάθε προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η αναγνώριση και η περιγραφή του προβλήματος, ο καθορισμός των παραμέτρων και των περιορισμών, η αναζήτηση λύσεων, η επιλογή βέλτιστης, και έπειτα η δοκιμή και η εφαρμογή της. Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές έτσι ώστε να εξυπηρετείται όσο το δυνατόν καλύτερα η αντικειμενική συνάρτηση. Για τη λύση περίπλοκων προβλημάτων όπως αυτό που παρουσιάζεται στη διπλωματική αυτή, για την εύρεση των λύσεων γίνεται χρήση επαναληπτικών τεχνικών και αλγορίθμων.

5.4.2. Λογισμικό “Evolver”

Το λογισμικό “Evolver”, πρόκειται για ένα πρόσθετο του “Microsoft Excel” το οποίο χρησιμοποιεί γενετικούς αλγορίθμους, το “QptQuest” (το οποίο επιλύει μετά-ευρετικές μεθόδους και στοιχεία νευρωνικών δικτύων) και γραμμικό προγραμματισμό, για να επιλύσει γρήγορα διάφορα προβλήματα βελτιστοποίησης. Χρησιμοποιώντας

καινοτόμες μεταλλάξεις και συνδυασμούς λύσεων, η εύρεση της καλύτερης λύσης στο λογισμικό αυτό προκύπτει έπειτα από εξερεύνηση όλου του χώρου των πιθανών λύσεων. Ο χρήστης ορίζει τα κατάλληλα δεδομένα εισόδου (inputs) και την αντικειμενική συνάρτηση, και το λογισμικό παράγει τα αντίστοιχα δεδομένα εξόδου (outputs).

5.4.3. Παράμετροι και αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου

Για να βρεθεί η βέλτιστη λύση με το λογισμικό “EvoIver” πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για τις παραμέτρους των μεταβλητών του πληθυσμού, της διασταύρωσης και της μετάλλαξης. Πιο συγκεκριμένα, για την παράμετρο του πληθυσμού επιλέχθηκαν οι τιμές 25, 50 και 75, για εκείνη της διασταύρωσης 0.2, 0.6 και 0.8 και για την μετάλλαξη 0.05, 0.15 και 0.25. Επομένως πραγματοποιήθηκαν συνολικά 27 συνδυασμοί (για κάθε τιμή πληθυσμού 9 συνδυασμοί παραμέτρων διασταύρωσης και μετάλλαξης). Με πολλές τιμές για κάθε παράμετρο και άρα πολλούς συνδυασμούς, τα αποτελέσματα αξιολογούνται καλύτερα και παρατηρούνται οι πιθανές αλλαγές των αποτελεσμάτων, κατά πόσο δηλαδή συγκλίνουν ή αποκλίνουν οι τιμές μεταξύ τους.

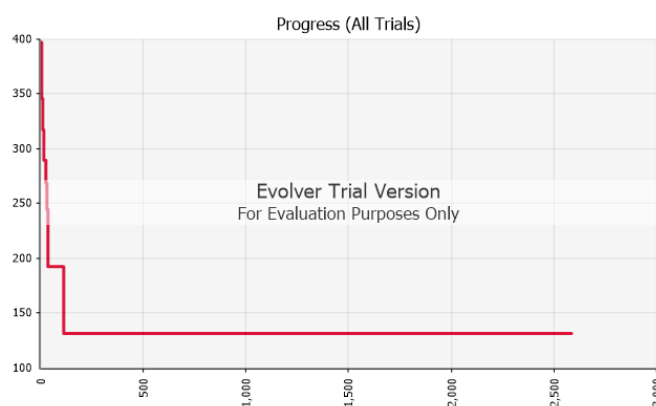
Η διάρκεια του κάθε συνδυασμού διαρκεί 30 λεπτά. Η διάρκεια αυτή επιλέχθηκε καθώς παρατηρήθηκε ότι μετά από τα 25 λεπτά δεν παρατηρούνται σημαντικές αλλαγές ως προς τη βέλτιστη λύση. Η βελτιστοποίηση εκτελέστηκε σε φορητό υπολογιστή με 8.00 GB RAM και επεξεργαστή Intel Core i7-7500U στα 2.70 GHz.

Στον πίνακα παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε συνδυασμό από το λογισμικό “EvoIver”. Όπως παρατηρείται, οι τιμές παρουσιάζουν σχετικά μικρές διαφορές για κάθε συνδυασμό παραμέτρων. Οι διαφορές αυτές οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει, καθώς έχει αποφευχθεί ο εγκλωβισμός σε κάποιο τοπικό βέλτιστο. Σε κάποιες περιπτώσεις βέβαια παρατηρήθηκε ότι ο αλγόριθμος εντοπίζει πιο γρήγορα μία “καλή” λύση με αποτέλεσμα να συγκλίνει πρώιμα και να εγκλωβίζεται σε κάποιο τοπικό ελάχιστο, μία τέτοια περίπτωση παρατηρήθηκε στο συνδυασμό 25,0.6,0.25 (εικόνα 11). Αυτό δικαιολογεί και το γεγονός ότι σε κάποιους συνδυασμούς, εντοπίζονται σημαντικές διαφορές στην αντικειμενική συνάρτηση.

Στον πίνακα 12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για όλους τους συνδυασμούς. Η στήλη “Objective function” αναφέρεται στην τιμή της

αντικειμενικής συνάρτησης η οποία υπολογίζει το συνολικό κόστος. Στη συνέχεια οι επόμενες 3 στήλες παρουσιάζουν τα επιμέρους κόστη για κάθε συνδυασμό, ενώ οι επόμενες στήλες περιλαμβάνουν τις συνολικές μετεπιβιβάσεις που γίνονται, τα συνολικά οχήματα που απαιτούνται καθώς και τους ανικανοποίητους μετακινούμενους για κάθε συνδυασμό σταθμών εξυπηρέτησης (RS1-RS2, RS1-RS3, RS2-RS3).

Από τον πίνακα 12 γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι δεν επιτρέπεται σε όλους τους συνδυασμούς ο ίδιος αριθμός “en-route transfers” (ο συνολικός αριθμός των επιτρεπόμενων διαδρομών αυτών κυμαίνονται από 6 έως 12 συνολικά). Αυτό βέβαια είναι αναμενόμενο καθώς στο μοντέλο έχουν τεθεί μόνο δύο περιορισμοί για την πραγματοποίηση των διαδρομών αυτών. Οι διαδρομές που επιτρέπουν την αλλαγή οχήματος κατά τη διάρκεια του ταξιδιού, εξαρτώνται από τις αρχικές διαδρομές που προκύπτουν από τον κάθε συνδυασμό. Αφού ο κάθε συνδυασμός έχει ως αποτέλεσμα διαφορετικές αρχικές διαδρομές, είναι αναμενόμενο να μην ικανοποιείται σε όλους τους συνδυασμούς ο ίδιος αριθμός διαδρομών με αλλαγή. Επιπλέον, επειδή δεν έχει τεθεί κάποιος περιορισμός για το μήκος των διαδρομών αυτών, ή για τους ελάχιστους κόμβους που θα πρέπει να εξυπηρετεί η κάθε διαδρομή, είναι πιθανό σε κάποιες διαδρομές που επιτρέπονται λιγότερες αλλαγές, να απαιτούνται περισσότερα οχήματα. Αξίζει επίσης να σημειωθεί, ότι αριθμός των συνολικών χιλιομέτρων (στήλη “Total distance”) εξαρτάται από το συνολικό μήκος που διανύουν όλα τα οχήματα από όλες τις διαδρομές που επιτρέπεται η αλλαγή. Επομένως, και σε αυτή την περίπτωση, επειδή οι διαδρομές που πραγματοποιούνται έχουν διαφορετικό μήκος, δεν είναι απαραίτητο διαδρομές με πολλά οχήματα και πολλές επιτρεπόμενες αλλαγές να παρουσιάζουν και μεγαλύτερες τιμές στα χιλιόμετρα, συγκριτικά με άλλες που έχουν λιγότερα οχήματα και λιγότερες διαδρομές με αλλαγή.



Εικόνα 11: Συνδυασμός 25,0.6,0.25, εγκλωβισμός σε τοπικό ελάχιστο

Πίνακας 12. Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου για όλους τους συνδυασμούς

Population	Crossover	Mutation	Objective function	Total cost RS1-RS2	Total cost RS1-RS3	Total cost RS2-RS3	Number of transfers RS1-RS2	Number of transfers RS1-RS3	Number of transfers RS2-RS3	Number of total transfers	Number of modules RS1-RS2	Number of modules RS1-RS3	Number of modules RS2-RS3	Total modules for all transfers	Unserved RS1-RS2	Unserved RS1-RS3	Unserved RS2-RS3	Total unserved	Total distance
25	0.2	0.05	103.008	12.064	39.344	51.6	1	4	3	8	3	11	9	23	3	25	18	46	27.84
25	0.2	0.15	116.82	41.1	39.52	31.2	3	5	2	10	16	19	8	43	7	4	0	12	49.8
25	0.2	0.25	136.92	47.16	20.96	68.8	3	3	5	11	13	13	18	44	7	0	6	13	61.6
25	0.6	0.05	113.38	29.36	59.00	27.02	2	2	2	9	9	9	1	19	2	37	2	41	36.15
25	0.6	0.15	120.84	59.744	31.52	28.82	3	3	2	8	14	9	7	30	16	11	3	30	49.97
25	0.6	0.25	131.38	45.56	24.64	61.18	3	4	5	12	10	10	15	35	6	14	22	44	51.15
25	0.8	0.05	116.96	44.6	11.44	60.92	3	2	3	8	14	5	8	27	16	0	25	41	39.7
25	0.8	0.15	113.984	47.984	22.56	43.44	3	4	3	10	12	16	10	38	11	4	19	34	41.32
25	0.8	0.25	104.64	40.6	6.8	57.24	-	2	4	6	-	6	14	20	-	0	17	17	39.7
50	0.2	0.05	131.46	54.4	37.72	39.34	2	4	2	10	6	13	7	26	4	23	18	45	59.55
50	0.2	0.15	128.22	35.16	62.44	30.62	3	4	3	10	11	13	9	33	2	1	0	3	37.35

50	0.2	0.25	118.18	18.76	32.44	66.98	1	2	4	7	3	7	15	25	0	5	5	10	45.65
50	0.6	0.05	126.06	35.74	32.76	57.56	3	3	4	10	13	10	12	35	6	4	3	13	52.55
50	0.6	0.15	134.88	10.2	60.72	63.96	-	5	5	10	-	17	17	34	-	18	17	35	42.4
50	0.6	0.25	119.78	29.56	42.4	48.82	2	3	4	9	9	13	10	32	0	10	0	10	40.15
50	0.8	0.05	106.08	39.12	26.8	40.16	5	3	2	10	15	10	10	35	3	2	1	6	42.9
50	0.8	0.15	131.46	54.4.	37.72	39.94	2	4	2	8	6	12	7	25	4	23	7	34	59.55
50	0.8	0.25	102.00	46.58	34.48	20.94	2	3	1	6	12	9	3	24	4	13	1	18	41.5
75	0.2	0.05	104.64	40.6	6.8	57.24	-	2	4	6	-	6	14	30	-	0	17	17	39.7
75	0.2	0.15	120.36	31.48	51.2	37.68	2	4	2	8	5	13	6	24	15	20	10	45	40.5
75	0.2	0.25	130.84	53.34	39.2	38.3	3	4	3	10	12	14	7	33	24	16	3	43	59.15
75	0.6	0.05	112.12	34.52	47.44	39.16	3	3	2	8	11	12	5	28	7	22	3	32	55.6
75	0.6	0.15	129.72	66.86	33.84	29.02	3	5	3	11	13	14	15	42	21	20	2	43	57.05
75	0.6	0.25	134.04	44.92	46.4	42.72	4	4	4	12	15	15	9	39	10	20	18	48	45.7
75	0.8	0.05	120.68	56.08	25.4	39.2	3	3	3	9	8	8	8	24	5	10	7	22	64.9
75	0.8	0.15	114.96	41.72	15.6	57.64	3	1	5	9	7	3	13	23	0	0	5	5	65.3
75	0.8	0.25	117.28	32.32	48.52	36.44	2	3	2	7	8	16	7	31	3	14	6	23	57.9

5.4.4. Επιλογή βέλτιστης λύσης

Με σκούρο πράσινο χρώμα στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζεται η βέλτιστη λύση του προβλήματος με τιμή συνολικού κόστους 102.00. Ο συνδυασμός αυτός προέκυψε με την τιμή του πληθυσμού 50, το συντελεστή διασταύρωσης 0.8 και συντελεστή μετάλλαξης 0.25. Οι συνολικές επιτρεπόμενες μετεπιβιβάσεις για τη βέλτιστη λύση είναι 6, ενώ η σχηματική απεικόνιση της παρουσιάζεται στις εικόνες 12,13,14.

Στους πίνακες 13,14,15, παρουσιάζονται όλες οι διαδρομές που προέκυψαν από την εφαρμογή του αλγορίθμου για κάθε συνδυασμό ζήτησης. Τα χρώματα στους πίνακες αυτούς δηλώνουν τις διαδρομές στις οποίες σύμφωνα με τους περιορισμούς, ικανοποιείται η “En-route transfer”. Για να πραγματοποιηθεί μία αλλαγή κατά τη διάρκεια του ταξιδιού, θα πρέπει να συνδεθούν δύο διαδρομές που εξυπηρετούν τη ζήτηση για διαφορετικές στάσεις μετρό. Στον πίνακα 13, παρουσιάζονται όλες οι διαδρομές που εξυπηρετούν τη ζήτηση για τη στάση του μετρό της Δάφνης (R.S.1) και για τη στάση του μετρό του Αγίου Ιωάννη (R.S.2). Η διαδρομή 3 που εξυπηρετεί τη ζήτηση για το μετρό της Δάφνης (με γκρι χρώμα) με αλληλουχία κόμβων 2-9-13-15-R.S.1, θα συνδεθεί με τη διαδρομή 3 (με γκρι χρώμα) που εξυπηρετεί το μετρό του Αγίου Ιωάννη με αλληλουχία κόμβων 9- R.S.2. Ο κοινός κόμβος των δύο διαδρομών είναι ο κόμβος 9, ο οποίος παρουσιάζεται και με έντονο μαύρο χρώμα. Επειδή οι διαδρομές αυτές δημιουργήθηκαν ξεχωριστά για την εξυπηρέτηση για το μετρό της Δάφνης και ξεχωριστά για το μετρό του Αγίου Ιωάννη, τυχαίνει να έχουν τον ίδιο αριθμό διαδρομής, που βέβαια όπως φαίνεται και στην αλληλουχία κόμβων πρόκειται για διαφορετικές διαδρομές. Για να μη δημιουργηθεί σύγχυση, με τους αριθμούς των διαδρομών, θα προκύψει μία νέα αρίθμηση για κάθε διαδρομή που ικανοποιεί το κριτήριο της “en-route transfer”. Η νέα αυτή αρίθμηση για όλες τις διαδρομές που πραγματοποιείται η μετεπιβίβαση παρουσιάζεται συγκεντρωτικά στον πίνακα 16. Για παράδειγμα, η διαδρομή 3 με κατεύθυνση RS1 θα μετονομαστεί σε διαδρομή 1, ενώ η διαδρομή 3 με κατεύθυνση RS2 θα μετονομαστεί σε διαδρομή 2 (πίνακας 16). Με την αρίθμηση αυτή, παρουσιάζονται και οι διαδρομές αυτές στις εικόνες 12, 13, 14 και στους πίνακες 17-22 που αναλύονται στη συνέχεια.

Αντίστοιχα παρουσιάζονται και οι διαδρομές που πρόκειται να ενωθούν και οι κοινοί τους κόμβοι για τους 2 άλλους συνδυασμούς. Σύμφωνα με τον πίνακα 14, μπορούν να πραγματοποιηθούν 3 μετεπιβιβάσεις για τις διαδρομές που εξυπηρετούν

τη ζήτηση για το μετρό της Δάφνης και του Αγίου Δημητρίου, ενώ σύμφωνα με τον πίνακα 15, μπορεί να πραγματοποιηθεί 1 μετεπιβίβαση για τις διαδρομές που εξυπηρετούν τη ζήτηση για το μετρό του Αγίου Ιωάννη και του Αγίου Δημητρίου. Η νέα αρίθμηση των διαδρομών που συνδέονται για να ικανοποιήσουν την αλλαγή και για τους δύο αυτούς συνδυασμούς, παρουσιάζονται στον συγκεντρωτικό πίνακα 16.

Πίνακας 13. Αρχικές διαδρομές με βάση τη ζήτησή προς το μετρό της Δάφνης και του Αγίου Ιωάννη.

Σταθμός μετρό	Κόμβοι	Διαδρομές	Σταθμός μετρό	Κόμβοι	Διαδρομές
Δάφνης (R.S.1)	6	1	Άγιος Ιωάννης (R.S.2)	11	1
	1			12	
	11			4	
	12			10	2
	8	3			
	14	2		9	3
	4			5	4
	2	3		8	5
	9			15	
	13			13	
	15			7	6
	10	4		6	7
	5	5		1	
	3			2	8
	7	6		14	

Πίνακας 14. Αρχικές διαδρομές με βάση τη ζήτησή προς το μετρό της Δάφνης και του Αγίου Δημητρίου.

Σταθμός μετρό	Κόμβοι	Διαδρομές	Σταθμός μετρό	Κόμβοι	Διαδρομές
Δάφνης (R.S.1)	6	1	Άγιος Δημήτριος (R.S.3)	14	1
	1			2	2
	11			3	
	12			9	3
	8	2		13	4
	4			5	
	14	1		6	
	2	3		15	6
	9			11	7
	13			8	8
	15	12			
	10	4		7	
	5	5		4	9
	3			10	10
	7	6			

Πίνακας 15. Αρχικές διαδρομές με βάση τη ζήτησή προς το μετρό του Αγίου Ιωάννη και του Αγίου Δημητρίου

Σταθμός μετρό	Κόμβοι	Διαδρομές	Σταθμός μετρό	Κόμβοι	Διαδρομές
Άγιος Ιωάννης (R.S.2)	11	1	Άγιος Δημήτριος (R.S.3)	14	1
	12			2	
	4			3	
	10	2		9	3
	3			13	4
	9	3		5	
	5	4		1	
	8	5		6	5
	15			15	6
	13			11	7
	7	6		8	8
	6	7		12	
	1			7	
	2	8		4	9
	14			10	10





Στον πίνακα 16 όπως προαναφέρθηκε, συγκεντρώνονται και οι 6 συνολικά μετεπιβιβάσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν για όλους τους συνδυασμούς σύμφωνα με τους πίνακες 13,14,15. Πιο συγκεκριμένα, ο πίνακας αυτός παρουσιάζει για κάθε αλλαγή τις διαδρομές που συνδέονται, την κατεύθυνση τους, τον κοινό τους κόμβο καθώς και την νέα αρίθμηση που λαμβάνουν.

Πίνακας 16. Επιτρεπόμενες διαδρομές με αλλαγές για κάθε συνδυασμό αρχικών διαδρομών.


Αριθμός επιτρεπόμενων αλλαγών	Διαδρομές Αρχική ονομασία	Κατεύθυνση	Κοινοί κόμβοι	Διαδρομές Μετονομασία
1	3	RS1	9	1
	3	RS2		2
2	5	RS1	3	3
	2	RS2		4
3	2	RS1	14	5
	1	RS3		6
4	3	RS1	9	7
	3	RS3		8
5	5	RS1	3	9
	2	RS3		10
6	8	RS2	14	11
	1	RS3		12

Στις εικόνες 12,13,14, πραγματοποιείται η σχηματική απεικόνισή των διαδρομών αυτών. Με ίδιο χρώμα διαφορετικού τόνου φαίνονται οι διαδρομές ανά 2 που πρόκειται να ενωθούν. Για παράδειγμα, με ανοιχτό ροζ χρώμα στην εικόνα 12 ,παρουσιάζεται η διαδρομή 1 με αλληλουχία κόμβων 2->9->13->15->RS1 και με έντονο ροζ χρώμα η διαδρομή 2 με αλληλουχία κόμβων 9->RS2. Με κίτρινο χρώμα παρουσιάζεται ο κοινός κόμβος-στάση της διαδρομής αυτής (στην περίπτωση αυτή ο 9). Στη συνέχεια, δίνονται και οι βοηθητικοί πίνακες 17,18,19 που παρουσιάζουν τις διαδρομές με την αλληλουχία των στάσεων, που ικανοποιούν τη μετεπιβίβαση. Ο πίνακας 17 περιλαμβάνει τις διαδρομές που εξυπηρετούν τη ζήτηση για το σταθμό της Δάφνης και το σταθμό του Αγίου Ιωάννη, που αντιστοιχούν στην εικόνα 12, ενώ οι πίνακες 18,19 παρουσιάζουν τις διαδρομές που εξυπηρετούν τους άλλους δύο συνδυασμούς ζήτησης που ομοίως, αντιστοιχούν στις εικόνες 13,14.



Πίνακας 17.Στάσεις διαδρομών RS1-RS2

Διαδρομές που ικανοποιούν την μετεπιβίβαση	Κοινός κόμβος	Κατεύθυνση	Χρώμα	Αλληλουχία κόμβων
1	9	RS1		2->9->13->15-> RS1
2	9	RS2		9->RS2
3	3	RS1		5->3->RS1
4	3	RS2		10->3->RS2

Πίνακας 18.Στάσεις διαδρομών RS1-RS3

Διαδρομές που ικανοποιούν την μετεπιβίβαση	Κοινός κόμβος	Κατεύθυνση	Χρώμα	Αλληλουχία κόμβων
5	14	RS1		8->4->14->RS1
6	14	RS3		14->RS3
7	9	RS1		2->9->13->15-> RS1
8	9	RS3		9->RS3
9	3	RS1		5->3-> RS1
10	3	RS3		2->3->RS3

Πίνακας 19.Στάσεις διαδρομών RS2-RS3

Διαδρομές που ικανοποιούν την μετεπιβίβαση	Κοινός κόμβος	Κατεύθυνση	Χρώμα	Αλληλουχία κόμβων
11	14	RS2		2->14->RS2
12	14	RS3		14->RS3

Οι πίνακες 20, 21, 22 παρουσιάζουν τα οχήματα που απαιτούνται στους αρχικούς και στους κοινούς κόμβους κάθε διαδρομής για τους 3 συνδυασμούς. Για παράδειγμα, στη διαδρομή 1 που πραγματοποιείται μετεπιβίβαση ξεκινάνε δύο οχήματα από τον αρχικό κόμβο 2 (πίνακας 20), ενώ στη διαδρομή 2 επειδή ο κοινός κόμβος είναι και αρχικός δεν ξεκινάει κάποιο όχημα από τον κόμβο 9, αλλά παραμένει 1 στη στάση έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η μετεπιβίβαση όταν τα 2 οχήματα από τον αρχικό κόμβο 2 φθάσουν στον κοινό κόμβο 9 (πίνακας 20). Αφού πραγματοποιηθεί η αλλαγή και επιβιβαστούν και οι μετακινούμενοι από τον κοινό κόμβο 9, συνδέονται 3 οχήματα προκειμένου να εξυπηρετήσουν τη ζήτηση με κατεύθυνση το μετρό της Δάφνης (RS1) και 3 οχήματα με κατεύθυνση το μετρό του Αγίου Ιωάννη (RS2). Αντίστοιχα, και για τις υπόλοιπες διαδρομές και για τους πίνακες 21,22.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλες τις διαδρομές, στις στάσεις πριν τον κοινό κόμβο επιβιβάζονται μετακινούμενοι που επιθυμούν να μεταβούν και στους δύο σταθμούς μετρό (για κάθε συνδυασμό σταθμών του μετρό), ενώ μετά την αλλαγή στις επόμενες στάσεις, επιβιβάζονται μόνο μετακινούμενοι που επιθυμούν να μεταβούν στη στάση του μετρό που εξυπηρετεί η κατεύθυνση της κάθε διαδρομής.

Πίνακας 20.Στόλος αρθρωτών αυτόνομων οχημάτων για ικανοποίηση ζήτησης για το σταθμό του μετρό της Δάφνης και του Αγίου Ιωάννη

Διαδρομές που ικανοποιούν την μετεπιβίβαση	Αρχικός κόμβος	Οχήματα στον αρχικό κόμβο	Κοινός κόμβος	Οχήματα μετά τον κοινό κόμβο	Κατεύθυνση	Συνολικός αριθμός οχημάτων
1	2	2	9	3	RS1	12
2	9	1	9	3	RS2	
3	5	1	3	3	RS1	
4	10	2	3	3	RS2	

Πίνακας 21.Στόλος αρθρωτών αυτόνομων οχημάτων για ικανοποίηση ζήτησης για το για το σταθμό του μετρό Δάφνης και Αγίου Δημητρίου

Διαδρομές που ικανοποιούν την μετεπιβίβαση	Αρχικός κόμβος	Οχήματα στον αρχικό κόμβο	Κοινός κόμβος	Οχήματα μετά τον κοινό κόμβο	Κατεύθυνση	Συνολικός αριθμός οχημάτων
5	8	1	14	2	RS1	9
6	14	1	14	1	RS3	
7	2	1	9	1	RS1	
8	9	1	9	1	RS3	
9	5	1	3	2	RS1	
10	2	1	3	2	RS3	

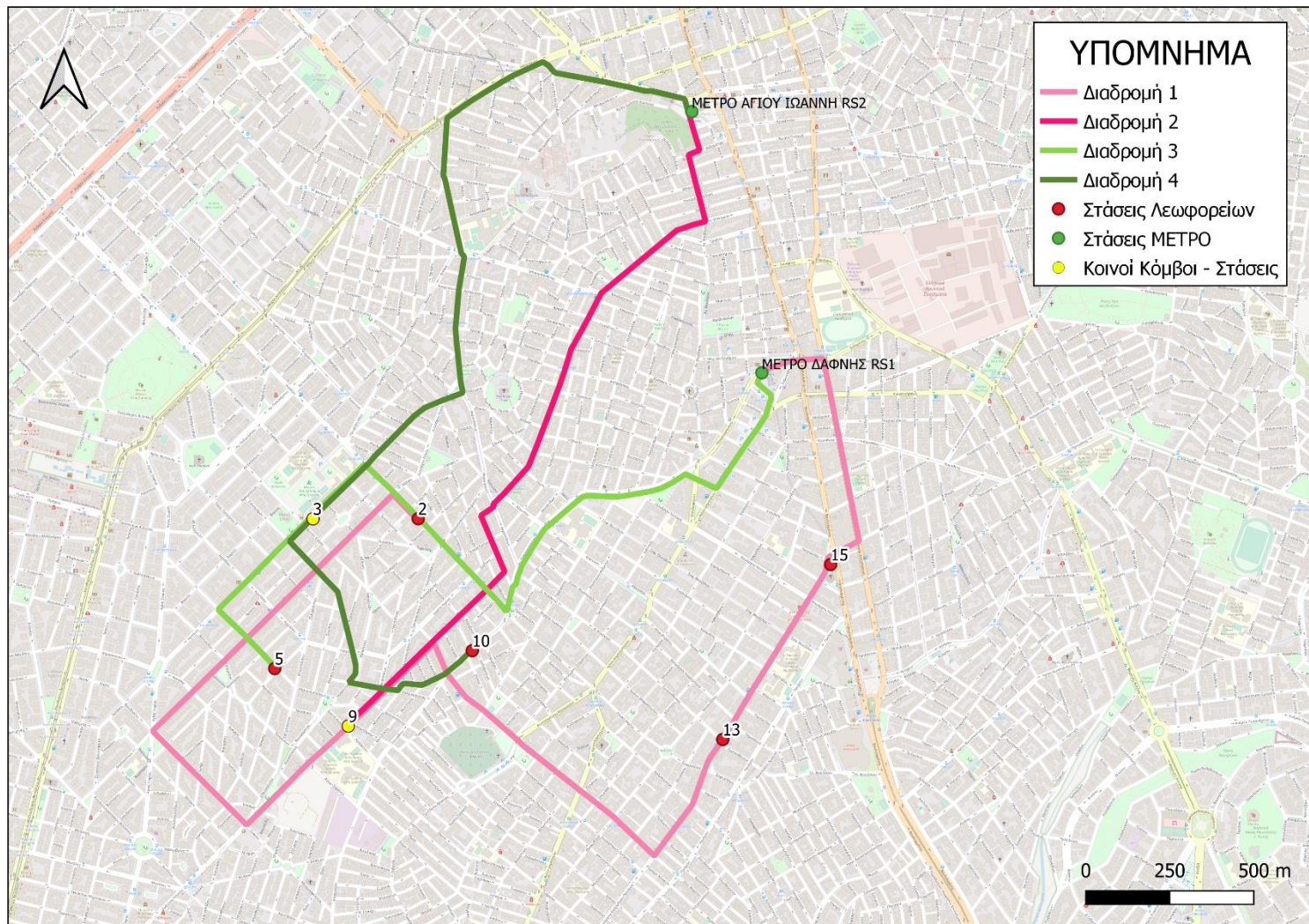
Πίνακας 22.Στόλος αρθρωτών αυτόνομων οχημάτων για ικανοποίηση ζήτησης για το για το σταθμό του μετρό Αγίου Ιωάννη και Αγίου Δημητρίου

Αριθμός επιτρεπόμενης αλλαγής	Αρχικός κόμβος	Οχήματα στον αρχικό κόμβο	Κοινός κόμβος	Οχήματα μετά τον κοινό κόμβο	Κατεύθυνση	Συνολικός αριθμός οχημάτων
11	2	2	14	2	RS2	3
12	14	-	14	1	RS3	

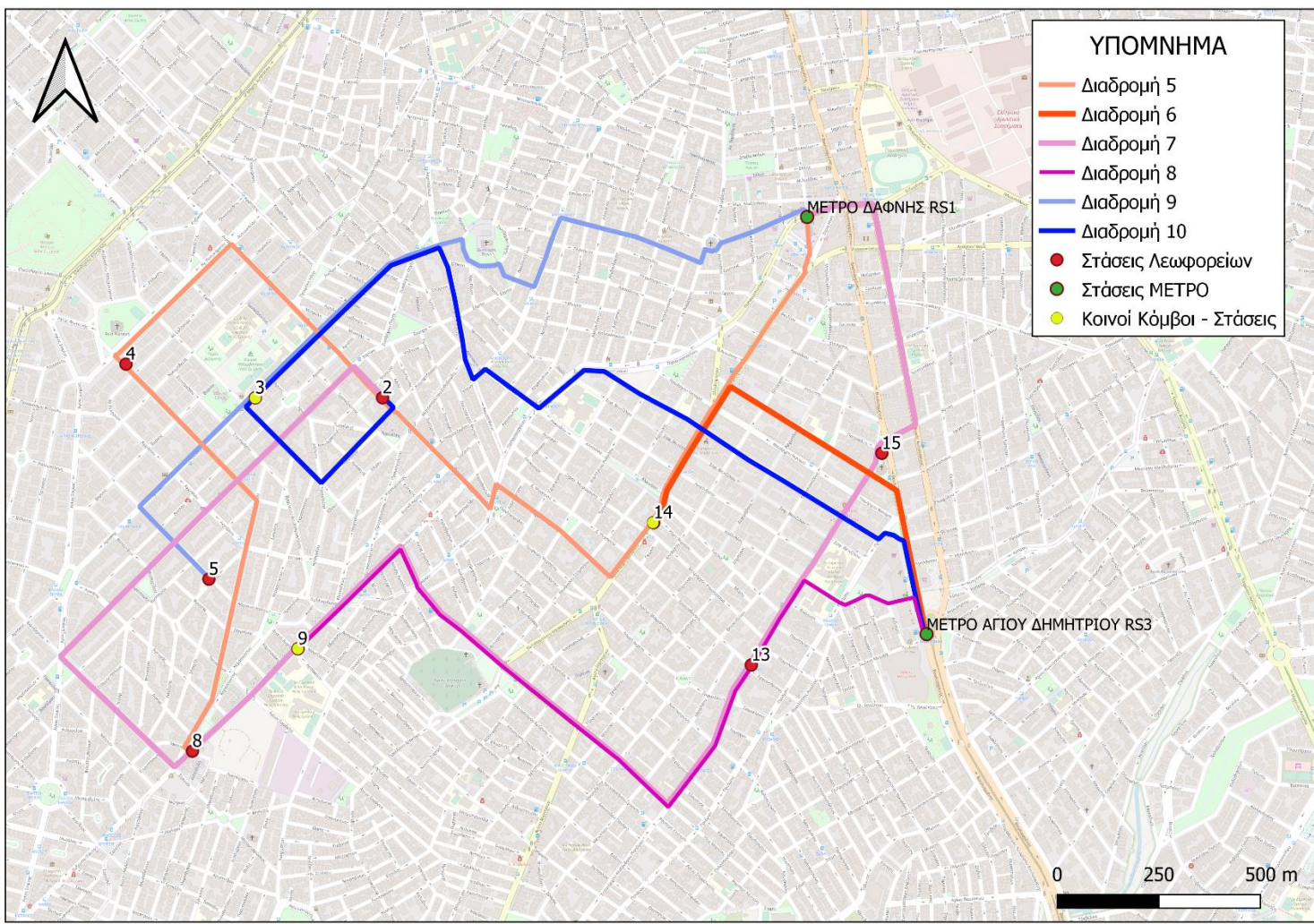
Στον πίνακα 23 παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός αυτόνομων αρθρωτών λεωφορείων που απαιτούνται για τη βέλτιστη λύση του προβλήματος, ο οποίος προκύπτει φυσικά από το άθροισμα των απαιτούμενων οχημάτων όλων των διαδρομών για όλους τους συνδυασμούς (πίνακες 20,21,22).

Πίνακας 23. Συνολικός στόλος λεωφορείων

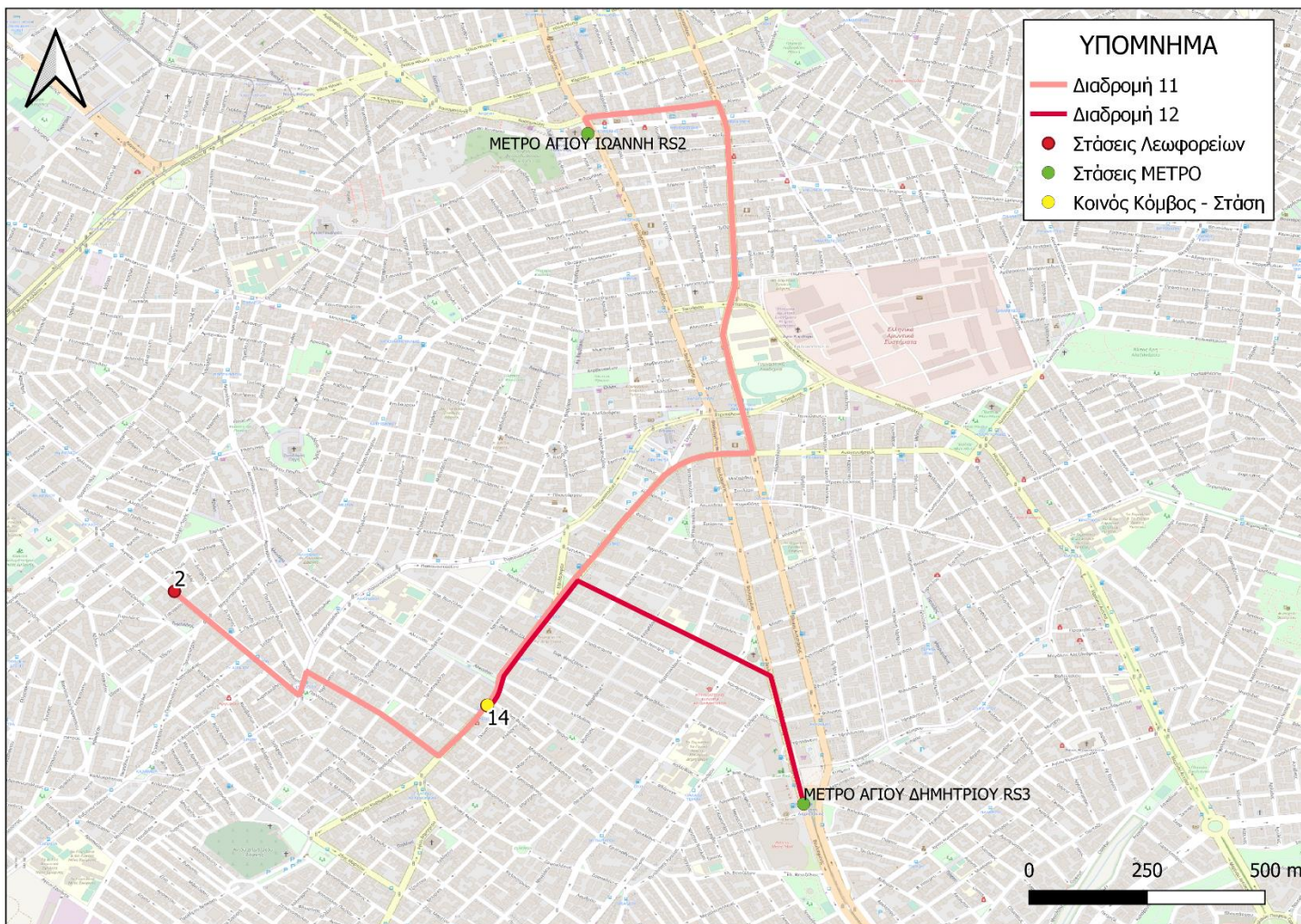
Σταθμοί μετρό	Στόλος αυτόνομων λεωφορείων	Συνολικός αριθμός αυτόνομων λεωφορείων
Δάφνης-Αγίου Ιωάννη	12	24
Δάφνης-Αγίου Δημητρίου	9	
Αγίου Ιωάννη- Αγίου Δημητρίου	3	



Εικόνα 12. Επιτρεπόμενες διαδρομές με αλλαγή για την εξυπηρέτηση ζήτησης του σταθμού μετρό της Δάφνης και του Αγίου Ιωάννη



Εικόνα 13. Επιτρεπόμενες διαδρομές με αλλαγή για την εξυπηρέτηση ζήτησης του σταθμού μετρό της Δάφνης και του Αγίου Δημητρίου.



Εικόνα 14. Επιτρεπόμενες διαδρομές με αλλαγή για την εξυπηρέτηση ζήτησης του σταθμού μετρό του Αγίου Ιωάννη και του Αγίου Δημητρίου.

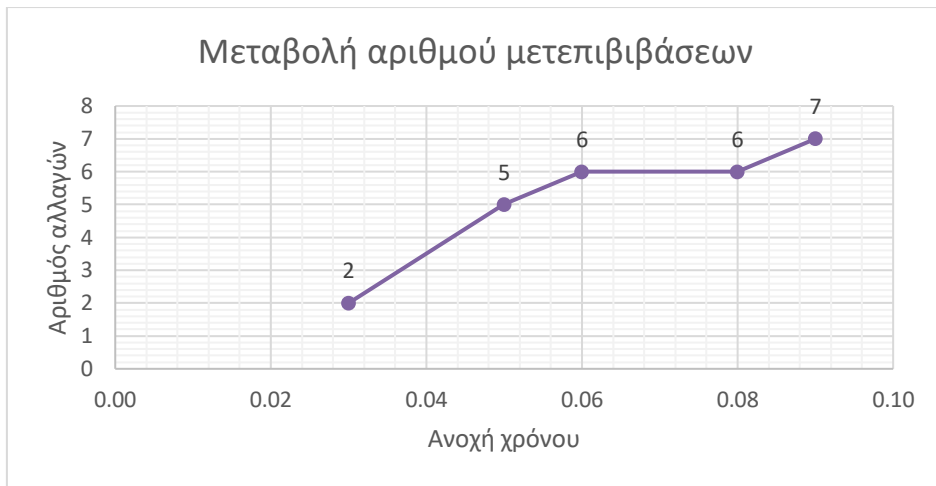
5.5. Ανάλυση ευαισθησίας

Αφού βρέθηκε η λύση του προβλήματος που ικανοποιεί καλύτερα τη συνάρτηση (βέλτιστη λύση), στη συνέχεια παρουσιάζεται η ανάλυση ευαισθησίας ως προς 3 βασικές παραμέτρους. Οι 3 παράμετροι που επιλέχθηκαν είναι η ανοχή του χρόνου (που επιτρέπει την μετάβαση σε άλλο όχημα κατά τη διάρκεια του ταξιδιού), η χωρητικότητα του κάθε οχήματος (“module capacity”) και η ζήτηση (“demand”).

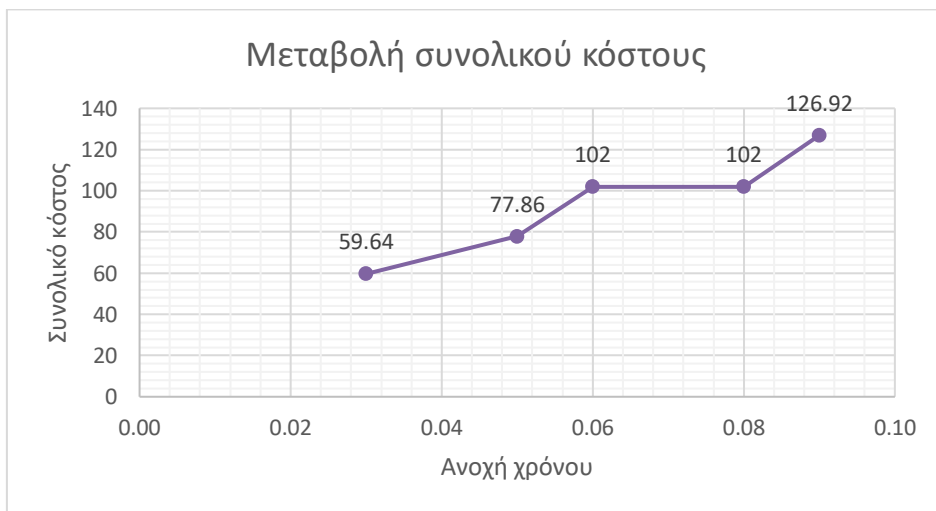
5.5.1. Ανοχή του χρόνου

Η ανοχή του χρόνου αποτελεί μία παράμετρο που καθορίζει τις διαδρομές στις οποίες επιτρέπεται να πραγματοποιηθεί η μετάβαση σε άλλο όχημα κατά τη διάρκεια του ταξιδιού (“en-route transfer”). Η ανοχή του χρόνου στο πρόβλημα, είχε οριστεί ίση με 0.08h που αντιστοιχεί σε περίπου 5 λεπτά. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη ανοχή ο επιτρεπόμενος αριθμός για “en-route transfer” για τη βέλτιστη λύση υπολογίστηκε ίσος με 6 (όπως παρουσιάστηκε και στην προηγούμενη υποενότητα στις *εικόνες 12,13,14*). Όσο μειώνεται η ανοχή τη χρόνου, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα στη συνέχεια, μειώνονται οι διαδρομές που μπορεί να πραγματοποιηθεί η μετάβαση σε άλλο όχημα κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Αντίστοιχα, με την αύξηση της ανοχής του χρόνου, το κριτήριο ικανοποιείται για περισσότερες διαδρομές. Φυσικά, σε κάποιες περιπτώσεις όπως για παράδειγμα στην τιμή 0.06h και 0.08h (*διάγραμμα 1*), μπορεί να τύχει να επιτρέπεται και ο ίδιος αριθμός διαδρομών, παρά την αύξηση ή τη μείωση του χρόνου ανοχής. Αυτό είναι πιθανότερο να συμβεί όταν οι τιμές είναι κοντινές.

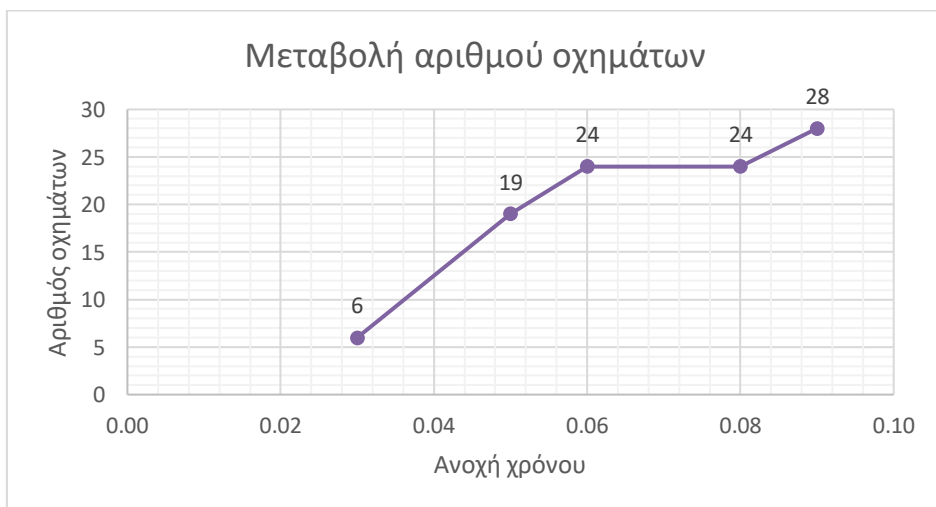
Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (συνολικό κόστος) επηρεάζεται από τον αριθμό των διαδρομών, καθώς με κάθε νέα διαδρομή, προστίθεται επιπλέον κόστος στην αντικειμενική συνάρτηση (*διάγραμμα 2*). Το συνολικό κόστος σύμφωνα με την αντικειμενική συνάρτηση που έχει οριστεί, εξαρτάται από τα συνολικά χιλιόμετρα των διαδρομών, τα οχήματα και την ανικανοποίητη ζήτηση. Νέες διαδρομές εισάγουν στην αντικειμενική συνάρτηση επιπλέον οχήματα (*διάγραμμα 3*), χιλιόμετρα και ανικανοποίητους μετακινούμενους. Στην περίπτωση που επιτρέπεται ο ίδιος αριθμός αλλαγών το κόστος, τα οχήματα και τα χιλιόμετρα όπως είναι αναμενόμενο, παραμένουν σταθερά.



Διάγραμμα 1. Μεταβολή αριθμού μετεπιβιβάσεων σε σχέση με την ανοχή του χρόνου.



Διάγραμμα 2. Μεταβολή του συνολικού κόστους σε σχέση με την ανοχή του χρόνου.



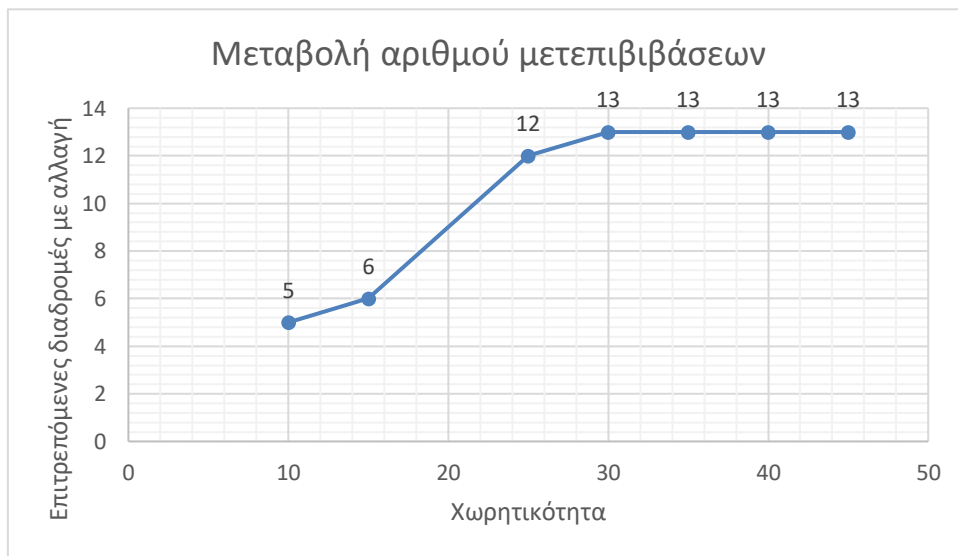
Διάγραμμα 3. Μεταβολή αριθμού οχημάτων σε σχέση με την ανοχή του χρόνου.

5.5.2. Χωρητικότητα αρθρωτών αυτόνομων ηλεκτρικών λεωφορείων

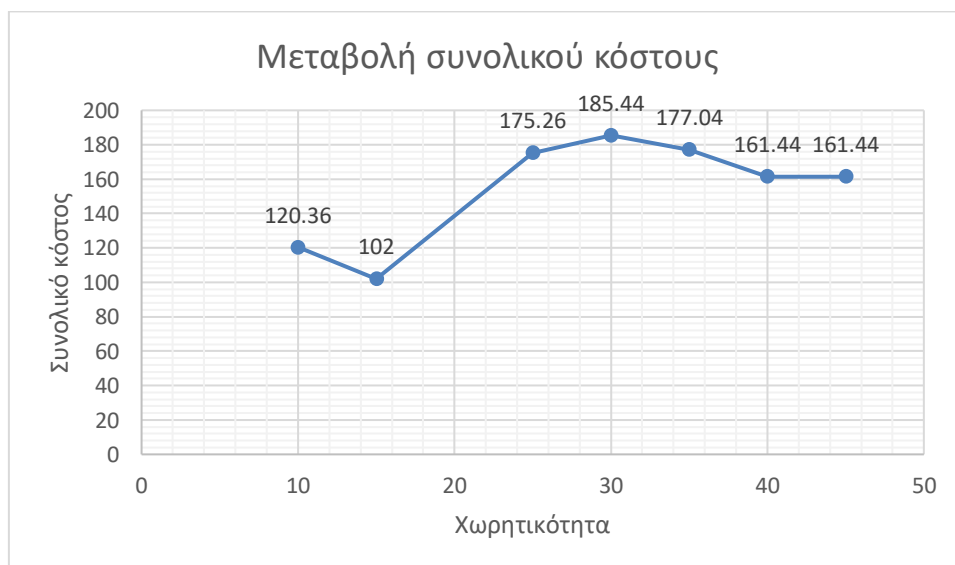
Όπως παρατηρείται από το *διάγραμμα 4* όσο αυξάνεται η χωρητικότητα των λεωφορείων (μέχρι την τιμή 30) τόσο αυξάνονται και οι διαδρομές επιτρεπόμενων αλλαγών. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς σύμφωνα με τον περιορισμό της χωρητικότητας (κεφάλαιο 3), για να πραγματοποιηθεί η “en-route transfer”, στον κοινό κόμβο πρέπει να είναι μέχρι 3 οχήματα συνδεδεμένα. Επομένως, με δεδομένη χωρητικότητα 15, για να επιτραπεί μία τέτοια διαδρομή θα πρέπει η ζήτηση από τις προηγούμενες στάσεις, πριν τον κοινό κόμβο, να μην υπερβαίνει τους 45 μετακινούμενους ($3 \cdot 15$). Στην περίπτωση όμως, που η χωρητικότητα αυξηθεί σε 30, όπως φαίνεται και στο *διάγραμμα*, το κριτήριο ικανοποιείται για 90 μετακινούμενους ($3 \cdot 30$). Εφόσον και στις δύο περιπτώσεις η ζήτηση είναι σταθερή, με όριο ζήτησης 90 μετακινούμενους, επιτρέπονται περισσότερες διαδρομές με αλλαγές από ότι με όριο 45 μετακινούμενους. Από την τιμή 30 και μετά παρατηρείται μία σταθεροποίηση των επιτρεπόμενων διαδρομών με αλλαγές. Αυτό συμβαίνει γιατί η τιμή 13, έτσι όπως έχει διαμορφωθεί το μοντέλο, είναι η μέγιστη. Οι υπόλοιπες πιθανές διαδρομές δεν ικανοποιούνται από το πρώτο κριτήριο της ανοχής χρόνου, και επομένως θεωρείται ότι δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί η “en-route transfer” (παρόλο που το κριτήριο της χωρητικότητας μπορεί να τις ικανοποιούσε).

Παρατηρώντας το *διάγραμμα* του κόστους για την τιμή χωρητικότητας 10 το κόστος είναι υψηλότερο από ότι εκείνης με 15. Το συνολικό κόστος όμως εξαρτάται εκτός από τα οχήματα και τα χιλιόμετρα, και από την ανικανοποίητη ζήτηση. Το κόστος αυξάνεται, καθώς, παρόλο που επιτρέπεται μία διαδρομή λιγότερη (*διάγραμμα 4*), τα οχήματα που απαιτούνται για αυτή τη διαδρομή είναι 2 (ελάχιστος αριθμός οχημάτων για διαδρομή άρα δεν επιβαρύνει σημαντικά το κόστος), η διαφορά στα χιλιόμετρα είναι μικρή (άρα η επιπλέον διαδρομή που ικανοποιεί το κριτήριο για χωρητικότητα 15 θέσεις έχει μικρό μήκος, δεν επιβαρύνει σημαντικά το κόστος) και η ανικανοποίητη ζήτηση για χωρητικότητα λεωφορείου 10 θέσεων είναι κατά πολύ μεγαλύτερη συγκριτικά με τη χωρητικότητα 15 θέσεων. Επομένως, η αύξηση του κόστους οφείλεται κυρίως στη μεγάλη τιμή της ανικανοποίητης ζήτησης. Στην συνέχεια για μεγαλύτερες τιμές χωρητικότητας το κόστος αυξάνεται παρόλο που στην κάθε διαδρομή ξεχωριστά το συνολικό κόστος μειώνεται. Ο λόγος που το κόστος αυξάνεται, οφείλεται στο γεγονός ότι επιτρέπονται πολλές νέες διαδρομές (6 επιπλέον διαδρομές συνολικά από χωρητικότητα με τιμή 15 σε 25, δηλαδή διπλάσιες). Οι νέες

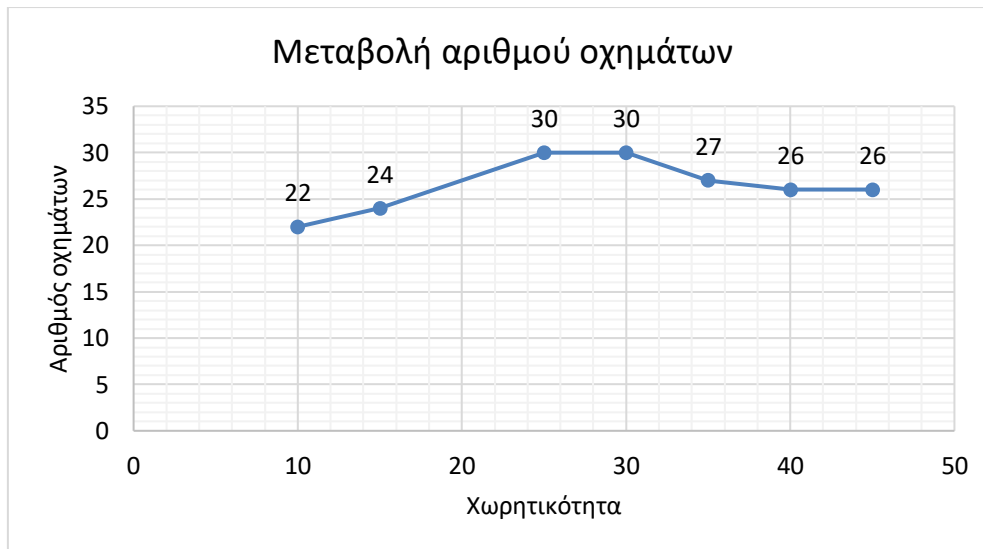
διαδρομές αυτές εισάγουν επιπλέον κόστος στο σύστημα. Αφού φτάσει στην τιμή 30 η χωρητικότητα, που πρόκειται για μία τιμή στην οποία ικανοποιείται ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός διαδρομών, το κόστος μειώνεται και στη συνέχεια σταθεροποιείται. Αυτό συμβαίνει γιατί οι διαδρομές είναι ίδιες και το κόστος της κάθε μίας μειώνεται (λιγότερα οχήματα, χιλιόμετρα και ανικανοποίητη ζήτηση). Η σταθεροποίηση μετά από μία τιμή είναι αναμενομένη καθώς απαιτούνται τα ίδια οχήματα, τα ίδια χιλιόμετρα και δεν υπάρχει ανικανοποίητη ζήτηση.



Διάγραμμα 4. Μεταβολή αριθμού μετεπιβιβάσεων σε σχέση με τη χωρητικότητα.



Διάγραμμα 5. Μεταβολή του συνολικού κόστους σε σχέση με τη χωρητικότητα.



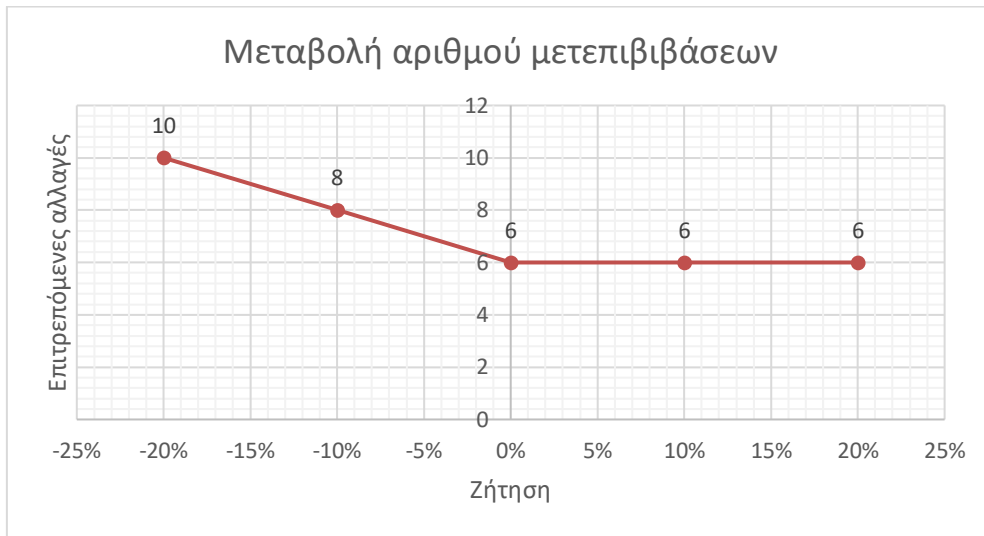
Διάγραμμα 6. Μεταβολή αριθμού οχημάτων σε σχέση με τη χωρητικότητα.

5.5.3. Ζήτηση

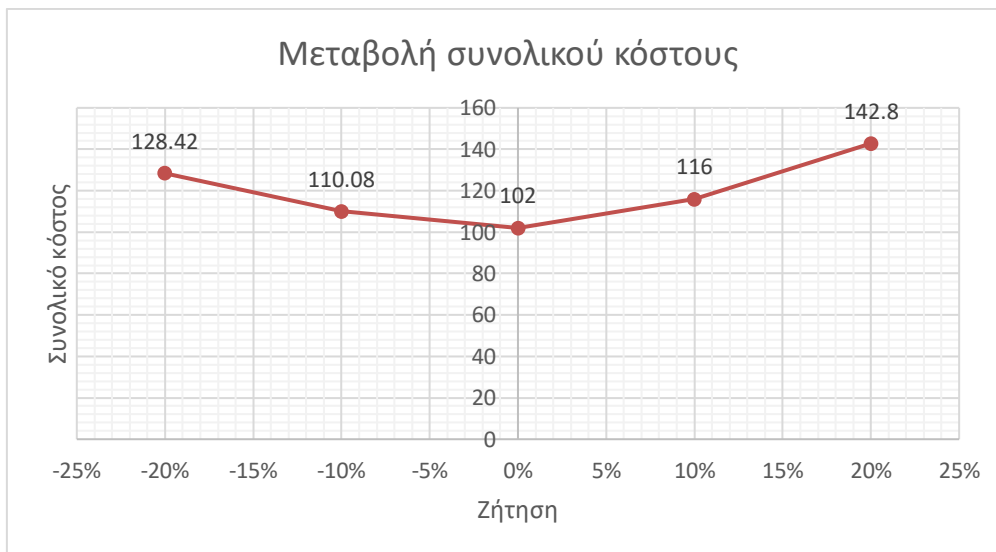
Μία ακόμα παράμετρος που εξετάστηκε είναι η μεταβολή στη ζήτηση που πρόκειται να ικανοποιεί το σύστημα αυτό. Οι μεταβολές στη ζήτηση επηρεάζουν άμεσα τις διαδρομές που ικανοποιεί το κριτήριο χωρητικότητας (διάγραμμα 7). Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το κριτήριο της χωρητικότητας, για δεδομένη χωρητικότητα 15 θέσεων επιτρέπεται όσο η ζήτηση πριν τον κοινό κόμβο δεν ξεπερνά τους 45 μετακινούμενους ($3 \cdot 15$). Εφόσον η ζήτηση μειώνεται, το κριτήριο αυτό ικανοποιείται για περισσότερες διαδρομές με αλλαγές. Για το λόγο αυτό, για μεταβολή στην αρχική ζήτηση ίση με -10% και -20% , παρατηρείται μία αναμενόμενη αύξηση στις επιτρεπόμενες διαδρομές με αλλαγή. Για τη μεταβολή $+10\%$ και $+20\%$ παρατηρείται ο ίδιος αριθμός επιτρεπόμενων αλλαγών (η ζήτηση δε λαμβάνει πολύ μεγάλες τιμές επομένως μία αύξηση μπορεί και να εξακολουθεί να ικανοποιεί το κριτήριο χωρητικότητας). Για ακόμα μεγαλύτερες μεταβολές, θα αναμέναμε μείωση στον αριθμό των επιτρεπόμενων αλλαγών.

Το συνολικό κόστος (διάγραμμα 8) αυξάνεται όσο μειώνεται η ζήτηση επειδή ικανοποιούνται νέες διαδρομές που επιβαρύνουν το κόστος. Το κόστος αυξάνεται και όσο αυξάνεται η ζήτηση. Αυτό συμβαίνει γιατί ενώ οι διαδρομές και ο αριθμός των οχημάτων είναι ίσος (με ένα επιπλέον όχημα στη μεταβολή 20%), η ανικανοποίητη ζήτηση λαμβάνει πολύ μεγάλες τιμές. Ο αριθμός οχημάτων είναι ίδιος στη μεταβολή

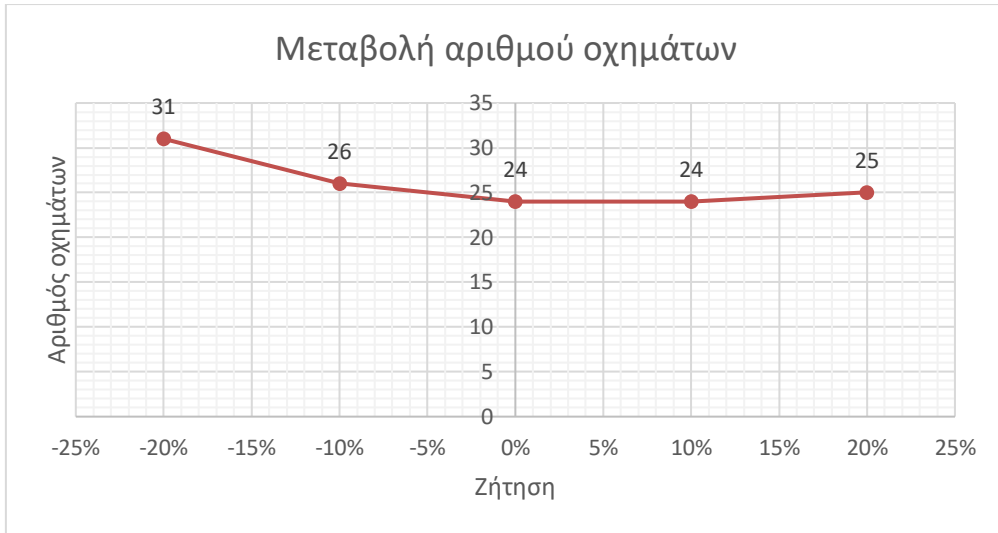
10% ενώ στη μεταβολή 20% προστίθεται ένα επιπλέον όχημα για να εξυπηρετηθεί η επιπλέον ζήτηση.



Διάγραμμα 7.Μεταβολή αριθμού μετεπιβιβάσεων σε σχέση με τη ζήτηση.



Διάγραμμα 8.Μεταβολή συνολικού κόστους σε σχέση με τη ζήτηση.



Διάγραμμα 9. Μεταβολή του αριθμού των οχημάτων σε σχέση με τη ζήτηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά παρουσιάζεται μία σύνοψη της μελέτης και έπειτα σχολιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν. Τέλος, παρουσιάζονται ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη του προβλήματος.

6.2. Σύνοψη μελέτης διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός δικτύου τροφοδοτικών γραμμών με αρθρωτά αυτόνομα οχήματα. Η εφαρμογή του μοντέλου που διαμορφώθηκε εφαρμόστηκε στην Αττική και συγκεκριμένα στο νότιο τομέα Αθηνών. Οι τροφοδοτικές αυτές γραμμές, σχεδιάστηκαν για να εξυπηρετούν τη ζήτηση για 3 σταθμούς του μετρό (Δάφνης, Αγίου Ιωάννη και Αγίου Δημητρίου) από 15 προκαθορισμένες στάσεις λεωφορείου.

Η εισαγωγή της εργασίας έχει ως στόχο να παρουσιάσει τα προβλήματα που έχουν δημιουργηθεί εξαιτίας της εκρηκτικής εξάπλωσης των ιδιωτικών οχημάτων στο οδικό δίκτυο (με πιο σημαντικό την κυκλοφοριακή συμφόρηση), και τους λόγους για τους οποίους οι μετακινούμενοι θα πρέπει να χρησιμοποιούν τα μέσα μαζικής μεταφοράς. Στη συνέχεια, εντοπίζονται τα προβλήματα στο σχεδιασμό των αστικών συγκοινωνιών και οι λόγοι για τους οποίους τα μέσα μαζικής μεταφοράς στις μέρες μας αποτελούν συχνά, την τελευταία επιλογή των μετακινουμένων. Για να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα αυτά, προτείνεται μία νέα τεχνολογία, τα αυτόνομα ηλεκτρικά αρθρωτά λεωφορεία (“modular buses”) τα οποία πρόκειται να μειώσουν σημαντικά την κυκλοφοριακή συμφόρηση, να αναβαθμίσουν την ποιότητα των μέσων διαμορφώνοντας ένα ελκυστικό σύστημα αστικών συγκοινωνιών.

Το πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζει το αντικείμενο και το στόχο της διπλωματικής εργασίας, περιγράφοντας το πρόβλημα και τη δομή των κεφαλαίων που την απαρτίζουν.

Στο δεύτερο κεφάλαιο συγκεντρώνονται όλες οι έρευνες (παλιότερες και νέες) οι οποίες μελετήθηκαν και επεξεργάστηκαν. Οι έρευνες αυτές ομαδοποιούνται σε 3 διαφορετικές κατηγορίες ανάλογα με το περιεχόμενό τους. Η πρώτη κατηγορία, περιλαμβάνει τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε για τα προβλήματα της κατηγορίας σχεδιασμού τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείου (“Feeder bus network design problem”). Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μελέτες που σχετίζονται με τα συστήματα “DRT” (“Demand Responsive Transport”). Η τρίτη κατηγορία, περιλαμβάνει πληθώρα μελετών που επικεντρώνουν το ενδιαφέρον τους στο σχεδιασμό και τη λειτουργία δικτύων με αυτόνομα αρθρωτά ηλεκτρικά λεωφορεία (“modular buses”).

Στο επόμενο κεφάλαιο περιγράφεται το πρόβλημα με τις παραδοχές του, και στη συνέχεια διατυπώνεται μαθηματικά. Η μαθηματική διατύπωση συμπεριλαμβάνει την αντικειμενική συνάρτηση, τις μεταβλητές απόφασης και όλους τους περιορισμούς που τέθηκαν. Η αντικειμενική συνάρτηση στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους του συστήματος το οποίο εξαρτάται από το κόστος που σχετίζεται με το συνολικό αριθμό χιλιομέτρων, οχημάτων και με το κόστος που σχετίζεται με την ανικανοποίητη ζήτηση.

Το κεφάλαιο 4 περιλαμβάνει το θεωρητικό υπόβαθρο των γενετικών αλγορίθμων και την εφαρμογή του στο μοντέλο που διαμορφώθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται αρχικά, τα δεδομένα και η περιοχή μελέτης και στη συνέχεια τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου. Από τα αποτελέσματα αυτά, επιλέγεται η βέλτιστη λύση η οποία ικανοποιεί καλύτερα την αντικειμενική συνάρτηση. Στο τέλος του κεφαλαίου, πραγματοποιείται η ανάλυση ευαισθησίας με βάση τη βέλτιστη λύση ως προς 3 παραμέτρους (ανοχή του χρόνου διαδρομών επιτρεπόμενων αλλαγών, χωρητικότητας λεωφορείων και ζήτησης).

Το κεφάλαιο αυτό συμπεριλαμβάνει τα συμπεράσματα των αποτελεσμάτων και παρουσιάζει ορισμένες κατευθύνσεις και προτάσεις για περαιτέρω ανάπτυξη του προβλήματος.

6.3. Συμπεράσματα

Τα αυτόνομα αρθρωτά λεωφορεία, αποτελούν μία σύγχρονη καινοτόμα τεχνολογία η οποία πρόκειται να βελτιώσει τις συνθήκες που επικρατούν στα οδικά δίκτυα, περιορίζοντας σημαντικά την κυκλοφοριακή συμφόρηση, αλλά και να αναβαθμίσει τα μέσα μαζικής μεταφοράς προσφέροντας στους μετακινούμενους μία άμεση, γρήγορη και άνετη μετακίνηση. Για το λόγο αυτό όλο, πρόκειται για ένα θέμα που μελετάται όλο και περισσότερο από την επιστημονική κοινότητα με πληθώρα νέων ερευνών.

Η μεγάλη διαφορά της παρούσας εργασίας σε σχέση με άλλες που έχουν πραγματοποιηθεί, είναι ότι διαμορφώνει ένα δίκτυο από διαδρομές στο οποίο θα επιτρέπεται η αλλαγή οχήματος κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Ο μετακινούμενος από όποια στάση και αν βρίσκεται δε θα χρειαστεί να αποβιβαστεί σε μία ενδιάμεση στάση για να περιμένει το επόμενο λεωφορείο, αλλά αντιθέτως θα μπορεί να πραγματοποιήσει την αλλαγή αυτόματα, χωρίς καμία επιπλέον καθυστέρηση. Ακόμα, όπως έχει επισημανθεί, τα λεωφορεία αυτά αποτελούνται από αυτόνομα μικρά οχήματα που έχουν την ικανότητα να συνδέονται και αποσυνδέονται μεταξύ τους. Το χαρακτηριστικό τους αυτό τους επιτρέπει να προσαρμόζονται βέλτιστα στη ζήτηση ελαχιστοποιώντας τις κενές θέσεις.

Μία ακόμα σημαντική διαφορά της μελέτης αυτής συγκριτικά με άλλες είναι ότι εστιάζει στην πηγή του προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι πολλοί μετακινούμενοι χρησιμοποιούν το αυτοκίνητο τους καθημερινά για να μεταβούν σε κάποιο μέσο σταθερής τροχιάς ή επιλέγουν το ιδιωτικό τους όχημα για να ολοκληρώσουν τη μετακίνηση τους, επειδή η περιοχή κατοικίας τους δεν έχει καλή προσβασιμότητα με τα μέσα σταθερής τροχιάς. Για το λόγο αυτό, κρίθηκε απαραίτητο να εφαρμοστεί η νέα αυτή τεχνολογία για το σχεδιασμό τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείου που θα εξυπηρετούν τους μετακινούμενους από μία στάση κοντά στον τόπο κατοικίας τους σε σταθμούς σταθερής τροχιάς.

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό που τη διαφοροποιεί από άλλες, είναι ότι το μοντέλο της, διαμορφώθηκε με τέτοιο τρόπο έτσι να ικανοποιεί οποιαδήποτε ζήτηση. Έτσι θα μπορούσε πολύ εύκολα να αξιοποιηθεί και στην εφαρμογή που πρόκειται να δημιουργηθεί για τα λεωφορεία αυτά. Η εφαρμογή αυτή θα έχει ως στόχο το σχεδιασμό των διαδρομών με βάση τα αιτήματα των μετακινούμενων, για την καλύτερη

λειτουργία του συστήματος. Με τα αιτήματα αυτά θα διαμορφώνεται και η ζήτηση για κάθε στάση.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα που σχετίζεται με τη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε, είναι ότι παρόλο που πρόκειται για ένα περίπλοκο πρόβλημα που απαιτεί πολλούς υπολογισμούς, με τον αλγόριθμο που εφαρμόστηκε ο χρόνος περάτωσης είναι πολύ μικρός. Σε πολύ μικρό υπολογιστικό χρόνο τα αποτελέσματα είναι αξιόπιστα και ελαχιστοποιούν το κόστος. Επομένως, το μοντέλο αυτό θα μπορούσε να είναι ιδιαίτερα χρήσιμο και να αξιοποιηθεί και από τους αρμόδιους φορείς.

6.4. Προτάσεις για περαιτέρω ανάπτυξη της έρευνας

Όπως διαπιστώθηκε, το πρόβλημα δεν έχει μοναδικό τρόπο λύσης και μπορεί να προσεγγιστεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Πέρα όμως από τις παραλλαγές και τις μετατροπές που μπορούν να πραγματοποιηθούν, η έρευνα αυτή μπορεί να αποτελέσει τη βάση για άλλες μελλοντικές έρευνες, οι οποίες μπορούν να την βελτιώσουν και να την εξελίσσουν.

Μερικές απλές αλλαγές που θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν στο υφιστάμενο μοντέλο σχετίζονται με αλλαγές στους όρους της αντικειμενικής συνάρτησης. Θα μπορούσαν να προστεθούν νέες μεταβλητές ή κάποιες από αυτές που έχουν οριστεί να αντικατασταθούν από κάποιες άλλες. Θα μπορούσε να προστεθεί για παράδειγμα σα μεταβλητή, το κόστος που σχετίζεται με το χρόνο ταξιδιού των μετακινούμενων.

Πολλές παραλλαγές που θα μπορούσαν να βελτιώσουν το μοντέλο σχετίζονται με επιπλέον περιορισμούς για τις διαδρομές που πραγματοποιείται αλλαγή. Στο μοντέλο που κατασκευάστηκε οι περιορισμοί ήταν οι ελάχιστοι δυνατοί (κριτήριο ανοχής χρόνου και χωρητικότητας). Μερικοί επιπλέον περιορισμοί θα μπορούσαν να σχετίζονται με το ελάχιστο μήκος διαδρομής (να επιτρέπεται η δημιουργία μίας διαδρομής πάνω από κάποια χιλιόμετρα) ή με τον ελάχιστο αριθμό κόμβων-στάσεων (η κάθε διαδρομή να πρέπει να περιλαμβάνει τουλάχιστον 2 στάσεις). Ακόμα, θα μπορούσε να ληφθεί υπόψιν και ο παράγοντας καθυστέρησης των οχημάτων στους κοινούς κόμβους για την πραγματοποίηση των αλλαγής οχήματος. Επιπλέον, θα

μπορούσε να εισαχθεί ένα συγκεκριμένος αριθμός στόλου οχημάτων σε νέος περιορισμός.

Αλλαγές στις παραδοχές του προβλήματος θα μπορούσαν επίσης να εισάγουν βελτιώσεις στο πρόβλημα. Στο πρόβλημα που μελετήθηκε, όλοι οι μετακινούμενοι καταλήγουν σε μία από τις 3 στάσεις μετρό. Με αλλαγές στον αλγόριθμο και στα μητρώα προέλευσης προορισμού, θα μπορούσε να διαμορφωθεί το μοντέλο με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να επιτρέπεται η αποβίβαση μετακινούμενων σε άλλες ενδιάμεσες στάσεις. Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή ο χαρακτήρας του προβλήματος αλλάζει αρκετά και υπάγεται κυρίως στην κατηγορία προβλημάτων σχεδιασμού αστικών συγκοινωνιών.

Στο πρόβλημα που μελετήθηκε, επιτρέπεται μόνο μία αλλαγή οχήματος. Σε μία άλλη μορφή του προβλήματος αυτού, θα μπορούσαν να πραγματοποιούνται παραπάνω από μία αλλαγές, εισάγοντας όμως και μία ποινή για κάθε επιπλέον αλλαγή, καθώς δεν είναι εύκολο για τους επιβάτες να πραγματοποιούν πολλές αλλαγές. Μία άλλη ιδιαίτερα χρήσιμη παραλλαγή θα ήταν να επιτρέπεται επιπλέον όχημα όχι μόνο στον κοινό κόμβο, αλλά σε οποιαδήποτε στάση έτσι ώστε να προσαρμόζεται το μοντέλο ακόμα καλύτερα στη ζήτηση με λιγότερο κόστος. Αυτό βέβαια θα απαιτούσε την ύπαρξη αποθηκών σε κάθε στάση.

Μία ακόμα χρήσιμη αλλαγή θα μπορούσε να σχετίζεται με τους κόμβους που δεν ικανοποιούνται. Σε πολλές λύσεις είναι πιθανό το ενδεχόμενο ορισμένοι κόμβοι να μην εξυπηρετηθούν από τα λεωφορεία αυτά. Θα μπορούσε επομένως να διαμορφωθεί το μοντέλο με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να ικανοποιούνται όλοι οι κόμβοι με τη δημιουργία νέων διαδρομών. Μία ακόμα ενδιαφέρουσα προοπτική, θα ήταν η συνύπαρξη συμβατικών και αρθρωτών αυτόνομων λεωφορείων στο δίκτυο έτσι ώστε να εξυπηρετούνται όλοι οι κόμβοι.

Όπως διαπιστώθηκε στο πρόβλημα για την εύρεση των διαδρομών που επιτρέπεται η αλλαγή οχήματος κατά τη διάρκεια του ταξιδιού, μελετήθηκαν οι αρχικές διαδρομές για κάθε στάση μετρό ανά δύο. Μία πρόταση θα ήταν να μελετηθούν όλες οι αρχικές διαδρομές που εξυπηρετούν και τις 3 στάσεις μετρό ταυτόχρονα, λαμβάνοντας υπόψιν για κάθε στάση τη ζήτηση και για τις 3 στάσεις μετρό.

Μία ακόμα αλλαγή θα μπορούσε να σχετίζεται με την ταχύτητα. Στο πρόβλημα αυτό θεωρήθηκε ότι όλα τα οχήματα έχουν μία σταθερή ταχύτητα. Λαμβάνοντας

υπόψιν στο μοντέλο και τη γεωμετρία του οδικού δικτύου θα μπορούσαν να συνυπολογίζονται και οι διαφορετικές διακυμάνσεις στην ταχύτητα του.

Τέλος, όσον αφορά τη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε, ήδη από το κεφάλαιο 4, έγινε αντιληπτό ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλοί διαφορετικοί αλγόριθμοι για την επίλυση του προβλήματος. Οι ευρετικές και οι μεταερευτικές μέθοδοι έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικές. Επομένως το ίδιο πρόβλημα θα μπορούσε να επιλυθεί με μία από αυτές τις μεθόδους. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον και προοπτικές παρουσιάζουν και άλλες μέθοδοι οι οποίες ακόμα δεν έχουν εφαρμοστεί πολύ σε τέτοιου είδους προβλήματα όπως οι υβριδικές ή εκείνες που βασίζονται στη νοημοσύνη σμήνους. Μία από αυτές τις μεθόδους θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ακόμα και για την εύρεση της αρχικής λύσης. Η αρχική λύση στο πρόβλημα που μελετήθηκε παράγεται τυχαία και επηρεάζει τα αποτελέσματα. Επομένως, με μία καλύτερη αρχική λύση θα μπορούσαν να βελτιωθούν παραπάνω και τα τελικά αποτελέσματα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Caros, N. S., & Chow, J. Y. J. (2021). Day-to-day market evaluation of modular autonomous vehicle fleet operations with en-route transfers. *Transportmetrica B*, 9(1), 109–133.
2. Charisis, A., Iliopoulou, C., Kepaptsoglou, K., (2018). DRT route design for the first/last mile problem: model and application to Athens, Greece, *Public Transport*, 10(3), 499-527.
3. Chen, Z., Li, X., & Zhou, X. (2018). Operational design for shuttle systems with modular vehicles under oversaturated traffic: Discrete modeling method. *Transportation Research Part B: Methodological*, 122, 1–19.
4. Ciaffi F., Cipriani E., Petrelli M., 2012. «Feeder bus network design problem: a new metaheuristic procedure and real size applications», 15th meeting of the EURO Working Group on Transportation, *Procedia, Social and Behavioral Sciences* 54 (2012). 798-807.
5. Dai, Z., Liu, X. C., Chen, X., & Ma, X. (2020). Joint optimization of scheduling and capacity for mixed traffic with autonomous and human-driven buses: A dynamic programming approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 114, 598–619.
6. Davison, L., Enoch, M., Ryley, T., Quddus, M., & Wang, C. (2014). A survey of demand responsive transport in great Britain. *Transport Policy*, 31, 47–54.
7. Deng, L. B., Gao, W., Zhou, W. L., & Lai, T. Z. (2013). Optimal design of feeder-bus network related to urban rail line based on transfer system. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 96, 2383-2394
8. Hadi, A. M., Mirzapour, M. Z., Rehan, K. M. (2015). Validating an Improved Model for Feeder Bus Network Design Using Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO), *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 11, 507-522.
9. Hadi, A. M., Mirzapour, M. Z., Suhana, K., Rehan, K. M. (2014). Analysis of Feeder Bus Network Design and Scheduling Problems, *The Scientific World Journal*, 2014, 1-10.

10. Hadi, A. M., Ali, S., Yoonseok, O., Kim, D., Kang, S. (2018). Optimal Coordination Strategy for an Integrated Multimodal Transit Feeder Network Design Considering Multiple Objectives, *Sustainability*, 10(3), 734.
11. Hatzenbuehler, J., Cats, O., Jenelius, E., (2019). Optimal allocation of Autonomous Buses in line-based Public Transport Networks, *KTH Royal Institute of Technology*.
12. Iliopoulou, C., Kepaptsoglou, K., & Vlahogianni, E. (2019). Metaheuristics for the transit route network design problem: a review and comparative analysis. *Public Transport*, 11(3), 487-521
13. Ji, Y., Liu, B., Shen, Y., & Du, Y. (2021). Scheduling strategy for transit routes with modular autonomous vehicles. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 10(2), 121–135.
14. Kuah Geok, K., Perl, J., (1989). A Methodology for Feeder-Bus Network Design», *Transportation Research Record 1120*. 40-51
15. Kuan, S. N., Ong, H. L., & Ng, K. M. (2006). Solving the feeder bus network design problem by genetic algorithms and ant colony optimization. *Advances in Engineering Software*, 37(6), 351–359.
16. Laws, R., Enoch, M., Ison, S., & Potter, S. (2009). Demand Responsive Transport: A Review of Schemes in England and Wales. *Journal of Public Transportation*, 12(1), 19–37.
17. Liu, T., Ceder, A. A., & Rau, A. (2018). Scheduled Platoons of Public Transport Autonomous Modular Vehicles. *7th Symposium of the European Association for Research in Transportation (HEART2018)*, Athens, Greece
18. Liu, X., Qu, X., & Ma, X. (2021). Improving flex-route transit services with modular autonomous vehicles. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 149,
19. Martins, C. L., & Pato, M. V. (1998). Search strategies for the feeder bus network design problem. *European Journal of Operational Research*, 106(2–3), 425–440.
20. Next Future Transportation inc. <https://www.next-future-mobility.com/>
21. Nguyen, T., Xie, M., Liu, X., Arunachalam, N., Rau, A., Lechner, B., Busch, F., & Wong, Y. D. (2019). Platooning of autonomous public transport vehicles: The influence of ride comfort on travel delay. *Sustainability*, 11(19).
22. Pei, M., Lin, P., Du, J., Li, X., & Chen, Z. (2021). Vehicle dispatching in

- modular transit networks: A mixed-integer nonlinear programming model. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 147, 102240. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102240>
23. Shrivastava, P., & O'Mahony, M. (2006). A model for development of optimized feeder routes and coordinated schedules-A genetic algorithms approach. *Transport Policy*, 13(5), 413–425. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2006.03.002>
 24. Wang, L., Zeng, L., Ma, W., & Guo, Y. (2021). Integrating Passenger Incentives to Optimize Routing for Demand-Responsive Customized Bus Systems. *IEEE Access*, 9, 21507–21521. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3055855>
 25. Wang, Z., Yu, J., Hao, W., Chen, T., & Wang, Y. (2020). Designing High-Freedom Responsive Feeder Transit System with Multitype Vehicles. *Journal of Advanced Transportation*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8365194>
 26. Wirasinghe, S. C. (1980). Nearly optimal parameters for a rail/feeder-bus system on a rectangular grid. *Transportation Research Part A: General*. 14(1), 33-40. [https://doi.org/10.1016/0191-2607\(80\)90092-8](https://doi.org/10.1016/0191-2607(80)90092-8)
 27. Zhang, W., Jenelius, E., Badia, H. (2019). Efficiency of Semi-Autonomous and Fully Autonomous Bus Services in Trunk-and-Branched Networks, *Journal of Advanced Transportation*, 2019, 1-17.
 28. Zhang, Z., Tafreshian, A., & Masoud, N. (2020). Modular transit: Using autonomy and modularity to improve performance in public transportation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 141, 102033. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102033>
 29. Zheng, M., Zhou, R., Liu, S., Liu, F., & Guo, X. (2020). Route Design Model of Multiple Feeder Bus Service Based on Existing Bus Lines. *Journal of Advanced Transportation*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8853872>
 30. Χρήστος, Λ. (2014). Ευέλικτες Υπηρεσίες Μεταφοράς: Συστήματα Μεταφορών Ανταποκρινόμενα Στη Ζήτηση (Drt)
 31. Γεωργόπουλος, Ε. Φ., Λυκοθανάσης, Σ. Δ., (1999). Εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγόριθμους, Πανεπιστήμιο Πατρών.
 32. Λυκοθανάσης, Σ., (2001). Γενετικοί Αλγόριθμοι και Εφαρμογές, Τόμος Γ', Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.
 33. Βαφειάδης Μ. 2005. Συνοπτικός οδηγός της γλώσσας προγραμματισμού Visual Basic.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κώδικας Visual Basic

```
Sub call_all()
```

```
Call getroutes
```

```
Call matchingnodes
```

```
Call nodes_total_time
```

```
Call total_cost_V12
```

```
Call total_cost_V13
```

```
Call total_cost_V23
```

```
End Sub
```

```
Sub renumb()
```

```
For i = 1 To 15
```

```
Worksheets("visual").Cells(i + 1, 1).Value = i
```

```
Worksheets("visual").Cells(i + 1, 2).Value = ""
```

```
Worksheets("visual").Cells(i + 1, 3).Value = ""
```

```
Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 1).Value = i
```

```
Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 2).Value = ""
```

```
Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 3).Value = ""
```

```
Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 1).Value = i
```

```
Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 2).Value = ""
```

```
Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 3).Value = ""
```

```
Next i
```

```
End Su
```

```
Sub init_pop_gen()
```

```
Call clearcells
```

```
Dim a(15), b(15), c(15) As Integer
```

```
For i = 1 To 15
```

```
    a(i) = i
```

```
    b(i) = 0
```

```
Next i
```

```
k = 1
```

```
While k <= 15
```

```
    di = Int(15 * Rnd() + 1)
```

```
    For i = 1 To 15
```

```
        If (a(i) = di And b(i) = 0) Then
```

```
            c(k) = a(i)
```

```
            b(i) = 1
```

```
            k = k + 1
```

```
        Exit For
```

```
    End If
```

```
Next i
```

```
Wend
```

```
For i = 2 To 16
```

```
    Worksheets("visual").Cells(i, 1).Value = c(i - 1)
```

```
Next i
```

```
For i = 1 To 15
```

```
    a(i) = i
```

```

    b(i) = 0
Next i

k = 1

While k <= 15
    di = Int(15 * Rnd() + 1)
    For i = 1 To 15
        If (a(i) = di And b(i) = 0) Then
            c(k) = a(i)
            b(i) = 1
            k = k + 1
        Exit For
    End If
Next i

Wend

For i = 2 To 16
    Worksheets("visual2").Cells(i, 1).Value = c(i - 1)
Next i

For i = 1 To 15
    a(i) = i
    b(i) = 0
Next i

k = 1

While k <= 15
    di = Int(15 * Rnd() + 1)
    For i = 1 To 15

```

```

If (a(i) = di And b(i) = 0) Then
    c(k) = a(i)
    b(i) = 1
    k = k + 1
    Exit For
End If
Next i

Wend

For i = 2 To 16
    Worksheets("visual3").Cells(i, 1).Value = c(i - 1)
Next i

End Sub

Sub getroutes()
Dim servt(15) As Single, d(15) As Single, pen() As Double, unserv(15) As Integer,
NodesUnsLine(15) As Integer, ind2(15) As Integer, srpos(), srpos2(), tot1(), tot2(), route(),
route2(), route3() As Single

Dim an(15), ind(15) As Integer, tb(15) As Single, ss(15) As Single, tot99() As Single,
NodesUns(15) As Integer, NodesUns3(15) As Integer, st(15) As Single, UnsDemNod(15) As
Integer, bus(15) As Integer

For i = 2 To 16
    getnew = Worksheets("visual").Cells(i, 1).Value
    For j = 20 To 34
        check = Worksheets("visual").Cells(j, 1).Value

        If check = getnew Then
            an(i - 1) = Worksheets("visual").Cells(j, 1).Value
            st(i - 1) = Worksheets("visual").Cells(j, 2).Value      ' service time
        End If
    Next j
Next i

```



```

        tb(i - 1) = Worksheets("visual").Cells(j, 3).Value        ' time from beginning
        d(i - 1) = Worksheets("demand").Cells(j - 16, 23).Value    ' demand from last
statio
        End If
        Next j
    Next i

```

```
cap = Worksheets("visual").Cells(38, 2).Value
```

```
Total = 0
```

```
rtnum = 1                    ' route number
```

```
stopit = 0                    ' indicates when to stop process
```

```
i = 1
```

```
ID = 1
```

```
NodesUnsln = 0                'NodesUnsln = 0
```

```
bus0 = 1                      'deixnei ton airthmo tw n lewforeion ta
opoia ta prosthesoume
```

```
While Not stopit = 1          'ftiaxw to sinolo pou einai mesa
an parw toys epivates apo to i
```

```
Total = Total + d(i)          ' sum of passengers from
start:ESVISA TO d0 kai d31 kai evala ena d(i) gt exw mia zhthsh
```

```
If Total < cap Then
```

```
    free = cap - Total          ' de xreiazete kati allo giati an
xwrane oloi tous pernw
```

```
    unserv(i) = 0
```

```
    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 5).Value = free
```

```
    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 6).Value = 0                'unserv=0
```

```
    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 7).Value = 0
```

```
    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 8).Value = unserv(i)
```

```
    ind(i) = rtnum          ' dilwnei se pia diadromi anikei i stasi
(i)
```

```

    bus(i) = bus0
    i = i + 1
End If

If Total = cap Then                                     ' an gemizei akriwvs epomeni
diadromi
    unserv(i) = 0
    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 5).Value = 0      'free=0
    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 6).Value = 0      'unserv=0
    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 7).Value = 0
    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 8).Value = unserv(i) ' de xreiazete na
metriseis de menei kaneis unserv,xreiazete omws na allaksei h diadromi kai na perasw stin
epomeni
    ind(i) = rtnum                                     '( kane copy paste to telefteo
kommati)
    rtnum = rtnum + 1
    bus(i) = bus0
    bus0 = bus0 + 1
    Total = 0
    i = i + 1
    ID = i
End If

If Total > cap Then
                                     ' an de xwrane oloi osoi 8elw vriskw poses
8eseis einai free, gemizw kai ipoloizw to unserv kai tote proxwraw stin epomeni diadromi
    free = cap - (Total - d(i))                       ' afairw aftous pou piga na valw
olous kai vlepw posoi xwrane
    unserv(i) = d(i) - free                             ' na ginoun unser(i)
    ind(i) = rtnum
    Total = 0
    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 5).Value = 0      'free=0
    Worksheets("visual").Cells(i + 1, 6).Value = unserv(i)

```

```

NodesUnsIn = NodesUnsIn + 1
NodesUns(NodesUnsIn) = an(i)
staseis 'grafta st excel
Worksheets("visual").Cells(i + 1, 7).Value = NodesUns(NodesUnsIn)
NodesUnsLine(NodesUnsIn) = i
Worksheets("visual").Cells(i + 1, 8).Value = unserv(i)
If unserv(i) > 0 Then
extrabus = unserv(i) \ cap
w = unserv(i) Mod cap
If w > 0 Then
extrabus = extrabus + 1
bus0 = bus0 + extrabus
bus(i) = bus0
Total = w
End If
End If
rtnum = rtnum + 1
i = i + 1
ID = i

End If

If i > 15 Then stopit = 1

Wend

For i = 1 To 15
Worksheets("visual").Cells(i + 1, 3).Value = ind(i)
Worksheets("visual").Cells(i + 1, 14).Value = bus(i)

```

Next i

basicroutes = rtnum

For i = 1 To 15

ReDim srpos(rtnum + 1), pen(rtnum)

counter = 0

ind(0) = 0

Next i

For i = 1 To 15

If ind(i - 1) < ind(i) Then

counter = counter + 1 ' metraei tis arxikes diadromes

srpos(counter) = i

basicroutes = counter

End If

Worksheets("visual").Cells(i, 18).Value = srpos(counter)

Next i

srpos(basicroutes + 1) = 16

tot = 0

ReDim tot1(basicroutes + 1)

'p = Sheet1.Cells(2, 5).Value ' sinterlests poinis, to ftiaxnw otan kathorisoume ti poini tha valoume

For k = 1 To basicroutes

a = srpos(k)

b = srpos(k + 1) - 1

```

dist = 0

dist0a = tb(a)

distb0 = Worksheets("times").Cells(3 + b, 18).Value

For j = a To (b - 1)                                     'na to valw apo ton
pinaka traveltimes

    dist = dist + Worksheets("times").Cells(3 + an(j), 2 + an(j + 1)).Value + st(j)
'to j thelei epanalhps? 'apostaseis metaxi tous kai xronos eksipiretisis se ka8e stasi ektos
apo to telefteo'

    Next j

'Debug.Print "dist" + CStr(dist)

tot1(k) = dist + st(b) + dist0a + distb0

' sinoliki apostasi= dist+ xronos eksip sto telefteo+ apostasi prwtis stasis apo amaskostasio+
apostasi telefteou apo metro

If tot1(k) > 0.6 Then pen(k) = tot1(k) - 0.6 ' pouni gia panw apo 30 lepta

Worksheets("visual").Cells(k + 1, 16).Value = pen(k)

Worksheets("visual").Cells(k + 1, 4).Value = tot1(k)

Next k

tota = 0

totb = 0

For k = 1 To basicroutes

Worksheets("visual").Cells(k + 1, 15).Value = 0

Next k

p = 10

For k = 1 To basicroutes

If pen(k) > 0 Then tot1(k) = tot1(k) * p * Exp(pen(k))

Worksheets("visual").Cells(k + 1, 17).Value = tot1(k)

```

```

Worksheets("visual").Cells(k + 1, 15).Value = bus(k)
    tota = tota + tot1(k)
Next k

un = 0
For i = 1 To 15 'to 15
    un = un + unserv(i)
Next i

'ena if g to an iparxei extra diadromi

'TotalCost = tota + totb + un + rtnum
Totalcost1 = tota + totb + un + rtnum
Worksheets("visual").Cells(3, 2).Value = Totalcost1
'TotalCost = Totalcost1

For i = 2 To 16
    getnew = Worksheets("visual2").Cells(i, 1).Value
    For j = 20 To 34
        check = Worksheets("visual2").Cells(j, 1).Value

        If check = getnew Then
            an(i - 1) = Worksheets("visual2").Cells(j, 1).Value
            st(i - 1) = Worksheets("visual2").Cells(j, 2).Value      ' service time
            tb(i - 1) = Worksheets("visual2").Cells(j, 3).Value      ' time from beginning
            d(i - 1) = Worksheets("demand").Cells(j - 16, 24).Value  ' demand from last
statio
        End If
    Next j
Next i

```

```

cap = Worksheets("visual2").Cells(38, 2).Value
Total = 0
rtnum = 1                                ' route number
stopit = 0                               ' indicates when to stop process
i = 1
ID = 1
NodesUnsln = 0                           'NodesUnsln = 0
bus0 = 1

While Not stopit = 1                      'ftiaxw to sinolo pou einai mesa
an parw toys epivates apo to i

Total = Total + d(i)                      ' sum of passengers from
start:ESVISA TO d0 kai d31 kai evala ena d(i) gt exw mia zhthsh

If Total < cap Then
    free = cap - Total                     ' de xreiazete kati allo giati an
xwrane oloi tous pernw
    unserv(i) = 0
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 5).Value = free
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 6).Value = 0                'unserv=0
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 7).Value = 0
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 8).Value = unserv(i)
    ind(i) = rtnum                        ' dilwnei se pia diadromi anikei i stasi
(i)
    bus(i) = bus0
    i = i + 1
End If

If Total = cap Then                        ' an gemizei akriwvs epomeni
diadromi
    unserv(i) = 0
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 5).Value = 0                'free=0

```

```

Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 6).Value = 0           'unserv=0
Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 7).Value = 0
Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 8).Value = unserv(i)   ' de xreiazete na
metriseis de menei kaneis unserv,xreiazete omws na allaksei h diadromi kai na perasw stin
epomeni
    ind(i) = rtnum           '( kane copy paste to telefteo
kommati)
    rtnum = rtnum + 1
    bus(i) = bus0
    bus0 = bus0 + 1
    Total = 0
    i = i + 1
    ID = i
End If

If Total > cap Then
    ' an de xwrane oloi osoi 8elw vriskw poses
8eseis einai free, gemizw kai ipoloizw to unserv kai tote proxwraw stin epomeni diadromi
    free = cap - (Total - d(i))           ' afairw aftous pou piga na valw
olous kai vlepw posoi xwrane
    unserv(i) = d(i) - free           ' na ginoun unser(i)
    ind(i) = rtnum
    Total = 0
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 5).Value = 0           'free=0
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 6).Value = unserv(i)
    NodesUnsIn = NodesUnsIn + 1
    NodesUns(NodesUnsIn) = an(i)           'deixnei ston pinaka m ts
staseis 'grafta st excel
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 7).Value = NodesUns(NodesUnsIn)
    NodesUnsLine(NodesUnsIn) = i
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 8).Value = unserv(i)
    If unserv(i) > 0 Then
        extrabus = unserv(i) \ cap

```



```

w = unserv(i) Mod cap
If w > 0 Then
extrabus = extrabus + 1
bus0 = bus0 + extrabus
bus(i) = bus0
Total = w
End If
End If
rtnum = rtnum + 1
i = i + 1
ID = i
End If

If i > 15 Then stopit = 1

Wend

For i = 1 To 15
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 3).Value = ind(i)
    Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 14).Value = bus(i)
Next i

basicroutes = rtnum
For i = 1 To 15
    ReDim srpos(rtnum + 1), pen(rtnum)
    counter = 0
    ind(0) = 0
Next i

```

```

For i = 1 To 15
  If ind(i - 1) < ind(i) Then
    counter = counter + 1          ' metraei tis arxikes diadromes
    srpos(counter) = i
    basicroutes = counter
  End If
  Worksheets("visual2").Cells(i, 18).Value = srpos(counter)
Next i
srpos(basicroutes + 1) = 16
tot = 0

ReDim tot1(basicroutes + 1)

'p = Sheet1.Cells(2, 5).Value ' sintelests poinis, to ftiaxnw otan kathorisoume ti poini tha
valoume

For k = 1 To basicroutes
  a = srpos(k)
  b = srpos(k + 1) - 1
  dist = 0
  dist0a = tb(a)
  distb0 = Worksheets("times2").Cells(3 + b, 18).Value

  For j = a To (b - 1)          'na to valw apo ton
pinaka traveltimes
    dist = dist + Worksheets("times2").Cells(3 + an(j), 2 + an(j + 1)).Value + st(j)
'to j thelei epanalhps? 'apostaseis metaxi tous kai xronos eksipiretisis se ka8e stasi ekstos
apo to telefteo'
  Next j

'Debug.Print "dist" + CStr(dist)

```

```

tot1(k) = dist + st(b) + dist0a + distb0

' sinoliki apostasi= dist+ xronos eksip sto telefteo+ apostasi prwtis stasis apo amaskostasio+
apostasi telefteou apo metro

If tot1(k) > 0.6 Then pen(k) = tot1(k) - 0.6 ' poini gia panw apo 30 lepta

Worksheets("visual2").Cells(k + 1, 16).Value = pen(k)

Worksheets("visual2").Cells(k + 1, 4).Value = tot1(k)

Next k

tota = 0

totb = 0

p = 10

For k = 1 To basicroutes
If pen(k) > 0 Then tot1(k) = tot1(k) * p * Exp(pen(k))
Worksheets("visual2").Cells(k + 1, 17).Value = tot1(k)
Worksheets("visual2").Cells(k + 1, 15).Value = bus(k)
    tota = tota + tot1(k)
Next k

un = 0

For i = 1 To 15 'to 15
    un = un + unserv(i)
Next i

'ena if g to an iparxei extra diadromi

'TotalCost = tota + totb + un + rtnum

Totalcost1 = tota + totb + un + rtnum

Worksheets("visual2").Cells(3, 2).Value = Totalcost1

'TotalCost = Totalcost1

```

```

For i = 2 To 16
    getnew = Worksheets("visual3").Cells(i, 1).Value
    For j = 20 To 34
        check = Worksheets("visual3").Cells(j, 1).Value

        If check = getnew Then
            an(i - 1) = Worksheets("visual3").Cells(j, 1).Value
            st(i - 1) = Worksheets("visual3").Cells(j, 2).Value      ' service time
            tb(i - 1) = Worksheets("visual3").Cells(j, 3).Value      ' time from beginning
            d(i - 1) = Worksheets("demand").Cells(j - 16, 25).Value  ' demand from last
statio
            End If
        Next j
    Next i

```

```

cap = Worksheets("visual3").Cells(38, 2).Value
Total = 0
rtnum = 1      ' route number
stopit = 0     ' indicates when to stop process
i = 1
ID = 1
NodesUnsln = 0      'NodesUnslLine = 0
bus0 = 1

While Not stopit = 1      'ftiaxnw to sinolo pou einai mesa
    an parw toys epivates apo to i

    Total = Total + d(i)      ' sum of passengers from
start:ESVISA TO d0 kai d31 kai evala ena d(i) gt exw mia zhthsh

    If Total < cap Then

```

```

free = cap - Total
xwrane oloi tous pernw
                                ' de xreiazete kati allo giati an
unserv(i) = 0
Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 5).Value = free
Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 6).Value = 0
                                'unserv=0
Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 7).Value = 0
Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 8).Value = unserv(i)
ind(i) = rtnum
                                ' dilwnei se pia diadromi anikei i stasi
(i)
bus(i) = bus0
i = i + 1
End If

```

```

If Total = cap Then
diadromi
                                ' an gemizei akriwvs epomeni
unserv(i) = 0
Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 5).Value = 0
                                'free=0
Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 6).Value = 0
                                'unserv=0
Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 7).Value = 0
Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 8).Value = unserv(i)
                                ' de xreiazete na
                                metriseis de menei kaneis unserv,xreiazete omws na allaksei h diadromi kai na perasw stin
                                epomeni
ind(i) = rtnum
                                '( kane copy paste to telefteo
kommati)
rtnum = rtnum + 1
bus(i) = bus0
bus0 = bus0 + 1
Total = 0
i = i + 1
ID = i
End If

```

```

If Total > cap Then

```

' an de xwrane oloi osoi 8elw vriskw poses
8eseis einai free, gemizw kai ipoloizw to unserv kai tote proxwraw stin epomeni diadromi

free = cap - (Total - d(i)) ' afairw aftous pou piga na valw
olous kai vlepw posoi xwrane

unserv(i) = d(i) - free ' na ginoun unsert(i)

ind(i) = rtnum

Total = 0

Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 5).Value = 0 'free=0

Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 6).Value = unserv(i)

NodesUnsIn = NodesUnsIn + 1

NodesUns(NodesUnsIn) = an(i) 'deixnei ston pinaka m ts
staseis 'grafta st excel

Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 7).Value = NodesUns(NodesUnsIn)

NodesUnsLine(NodesUnsIn) = i

Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 8).Value = unserv(i)

If unserv(i) > 0 Then

extrabus = unserv(i) \ cap

w = unserv(i) Mod cap

If w > 0 Then

extrabus = extrabus + 1

bus0 = bus0 + extrabus

bus(i) = bus0

Total = w

End If

End If

rtnum = rtnum + 1

i = i + 1

ID = i

End If

If i > 15 Then stopit = 1

Wend

For i = 1 To 15

Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 3).Value = ind(i)

Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 14).Value = bus(i)

Next i

basicroutes = rtnum

For i = 1 To 15

ReDim srpos(rtnum + 1), pen(rtnum)

counter = 0

ind(0) = 0

Next i

For i = 1 To 15

If ind(i - 1) < ind(i) Then

counter = counter + 1 ' metraei tis arxikes diadromes

srpos(counter) = i

basicroutes = counter

End If

Worksheets("visual3").Cells(i, 18).Value = srpos(counter)

Next i

srpos(basicroutes + 1) = 16

tot = 0

ReDim tot1(basicroutes + 1)

'p = Sheet1.Cells(2, 5).Value ' sintelests poinis, to ftiaxnw otan kathorisoume ti poini tha valoume

```

For k = 1 To basicroutes
    a = srpos(k)
    b = srpos(k + 1) - 1
    dist = 0
    dist0a = tb(a)
    distb0 = Worksheets("times3").Cells(3 + b, 18).Value

    For j = a To (b - 1)
        'na to valw apo ton
        pinaka traveltimes
        dist = dist + Worksheets("times3").Cells(3 + an(j), 2 + an(j + 1)).Value + st(j)
        'to j thelei epanalhps? 'apostaseis metaxi tous kai xronos eksipiretisis se ka8e stasi ektos
        apo to telefteo'
    Next j

    'Debug.Print "dist" + CStr(dist)

    tot1(k) = dist + st(b) + dist0a + distb0
    ' sinoliki apostasi= dist+ xronos eksip sto telefteo+ apostasi prwtis stasis apo amaskostasio+
    apostasi telefteou apo metro
    If tot1(k) > 0.6 Then pen(k) = tot1(k) - 0.6 ' poini gia panw apo 30 lepta
    Worksheets("visual3").Cells(k + 1, 16).Value = pen(k)
    Worksheets("visual3").Cells(k + 1, 4).Value = tot1(k)
Next k

tota = 0
totb = 0
p = 10
For k = 1 To basicroutes
    If pen(k) > 0 Then tot1(k) = tot1(k) * p * Exp(pen(k))
    Worksheets("visual3").Cells(k + 1, 17).Value = tot1(k)
    Worksheets("visual3").Cells(k + 1, 15).Value = bus(k)
    tota = tota + tot1(k)
Next k

```



```

un = 0
For i = 1 To 15 'to 15
    un = un + unserv(i)
Next i
'ena if g to an iparxei extra diadromi

'TotalCost = tota + totb + un + rtnum
Totalcost1 = tota + totb + un + rtnum
Worksheets("visual3").Cells(3, 2).Value = Totalcost1
'TotalCost = Totalcost1

End Sub

Sub matchingnodes()
Dim ini_pop_B12_v1(2 To 16) As Integer
Dim ini_pop_B12_v2(2 To 16) As Integer
Dim routenum_B12_v1(2 To 16) As Integer
Dim routenum_B12_v2(2 To 16) As Integer

Dim ini_pop_B13_v1(2 To 16) As Integer
Dim ini_pop_B13_v3(2 To 16) As Integer
Dim routenum_B13_v1(2 To 16) As Integer
Dim routenum_B13_v3(2 To 16) As Integer

Dim ini_pop_B23_v2(2 To 16) As Integer
Dim ini_pop_B23_v3(2 To 16) As Integer
Dim routenum_B23_v2(2 To 16) As Integer
Dim routenum_B23_v3(2 To 16) As Integer

Dim i, j, k As Integer

```

'BUS 1,2

For i = 2 To 16

 ini_pop_B12_v1(i) = Worksheets("visual").Cells(i, 1).Value ' reading the initial population

 ini_pop_B12_v2(i) = Worksheets("visual2").Cells(i, 1).Value ' reading the initial
population

 routenum_B12_v1(i) = Worksheets("visual").Cells(i, 3).Value ' reading the route number

 routenum_B12_v2(i) = Worksheets("visual2").Cells(i, 3).Value ' reading the route
number

Next i

For k = 2 To 16

 For j = 2 To 16

 If ini_pop_B12_v1(k) = ini_pop_B12_v2(j) Then

 Worksheets("common_routes12").Cells(j, 1).Value = ini_pop_B12_v1(k)

 Worksheets("common_routes12").Cells(j, 2).Value = routenum_B12_v1(k)

 Worksheets("common_routes12").Cells(j, 4).Value = routenum_B12_v2(j)

 End If

 Next j

Next k

.....

i = 0

j = 0

k = 0

'BUS 1,3

For i = 2 To 16

 ini_pop_B13_v1(i) = Worksheets("visual").Cells(i, 1).Value ' reading the initial population

 ini_pop_B13_v3(i) = Worksheets("visual3").Cells(i, 1).Value ' reading the initial
population

 routenum_B13_v1(i) = Worksheets("visual").Cells(i, 3).Value ' reading the route number

 routenum_B13_v3(i) = Worksheets("visual3").Cells(i, 3).Value ' reading the route
number

Next i

For k = 2 To 16

 For j = 2 To 16

 If ini_pop_B13_v1(k) = ini_pop_B13_v3(j) Then

 Worksheets("common_routes13").Cells(j, 1).Value = ini_pop_B13_v1(k)

 Worksheets("common_routes13").Cells(j, 2).Value = routenum_B13_v1(k)

 Worksheets("common_routes13").Cells(j, 4).Value = routenum_B13_v3(j)

 End If

 Next j

Next k

i = 0

j = 0

k = 0

'BUS 1,3

For i = 2 To 16

 ini_pop_B23_v2(i) = Worksheets("visual2").Cells(i, 1).Value ' reading the initial population

 ini_pop_B23_v3(i) = Worksheets("visual3").Cells(i, 1).Value ' reading the initial population

 routenum_B23_v2(i) = Worksheets("visual2").Cells(i, 3).Value ' reading the route number

 routenum_B23_v3(i) = Worksheets("visual3").Cells(i, 3).Value ' reading the route number

Next i

For k = 2 To 16

 For j = 2 To 16

 If ini_pop_B23_v2(k) = ini_pop_B23_v3(j) Then

 Worksheets("common_routes23").Cells(j, 1).Value = ini_pop_B23_v2(k)

 Worksheets("common_routes23").Cells(j, 2).Value = routenum_B23_v2(k)

 Worksheets("common_routes23").Cells(j, 4).Value = routenum_B23_v3(j)

 End If

 Next j

Next k

i = 0

j = 0

k = 0

End Sub

Sub nodes_total_time()

Dim ini_pop_B12_v1(2 To 16) As Integer

Dim ini_pop_B12_v2(2 To 16) As Integer

Dim routenum_B12_v1(2 To 16) As Integer

Dim routenum_B12_v2(2 To 16) As Integer

Dim ini_pop_B13_v1(2 To 16) As Integer

Dim ini_pop_B13_v3(2 To 16) As Integer

Dim routenum_B13_v1(2 To 16) As Integer

Dim routenum_B13_v3(2 To 16) As Integer

Dim pin1(15) As Integer

Dim pin2(15) As Integer

Dim pin3(15) As Integer

Dim ini_pop_B23_v2(2 To 16) As Integer

Dim ini_pop_B23_v3(2 To 16) As Integer

Dim routenum_B23_v2(2 To 16) As Integer

Dim routenum_B23_v3(2 To 16) As Integer

Dim servicetime(18 To 34), servicetime2(18 To 34), servicetime3(18 To 34) As Double

Dim diadromes_komvoi() As Integer

Dim i, j, k, count, count3 As Integer

Dim p, pos, a, b, totalxk1, totalxk2 As Integer

Dim addi As Integer

Dim timek, time1, time2 As Double

Dim mes, mes2, mes3 As String

For m = 1 To 15

For n = 1 To 10

Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(m, n).Value = ""

Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(m, n).Value = ""

Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(m, n).Value = ""

Next n

Next m

'Pinakas diadromwn_komwn_visual

For i = 2 To 16

ini_pop_B12_v1(i) = Worksheets("visual").Cells(i, 1).Value ' reading the initial population

ini_pop_B12_v2(i) = Worksheets("visual2").Cells(i, 1).Value ' reading the initial population

ini_pop_B13_v1(i) = Worksheets("visual").Cells(i, 1).Value ' reading the initial population

ini_pop_B13_v3(i) = Worksheets("visual3").Cells(i, 1).Value ' reading the initial population

ini_pop_B23_v2(i) = Worksheets("visual2").Cells(i, 1).Value ' reading the initial population

ini_pop_B23_v3(i) = Worksheets("visual3").Cells(i, 1).Value ' reading the initial population

routenum_B12_v1(i) = Worksheets("visual").Cells(i, 3).Value ' reading the route number

routenum_B12_v2(i) = Worksheets("visual2").Cells(i, 3).Value ' reading the route number

routenum_B13_v1(i) = Worksheets("visual").Cells(i, 3).Value ' reading the route number

routenum_B13_v3(i) = Worksheets("visual3").Cells(i, 3).Value ' reading the route number

```
    routenum_B23_v2(i) = Worksheets("visual2").Cells(i, 3).Value ' reading the route  
number
```

```
    routenum_B23_v3(i) = Worksheets("visual3").Cells(i, 3).Value ' reading the route  
number
```

```
Next i
```

```
For i = 20 To 34
```

```
    servicetime(i) = Worksheets("visual").Cells(i, 2).Value 'reading the service time
```

```
    servicetime2(i) = Worksheets("visual2").Cells(i, 2).Value 'reading the service time
```

```
    servicetime3(i) = Worksheets("visual3").Cells(i, 2).Value 'reading the service time
```

```
Next i
```

```
For i = 4 To 18
```

```
    pin1(i - 3) = Worksheets("demand").Cells(i, 19).Value
```

```
    pin2(i - 3) = Worksheets("demand").Cells(i, 20).Value
```

```
    pin3(i - 3) = Worksheets("demand").Cells(i, 21).Value
```

```
Next i
```

```
p = Worksheets("visual").Cells(2, 3).Value
```

```
j = 3
```

```
maxg1 = j
```

```
k = 1
```

```
Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(2, 1).Value = 1
```

```
For i = 2 To 16
```

```
    If Worksheets("visual").Cells(i, 3).Value = p Then
```

```
        Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k).Value = ini_pop_B12_v1(i)
```

```
    Else
```

```
        j = 3
```

```
        k = k + 1
```

```
    Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(2, k).Value = k
```

```
    Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k).Value = ini_pop_B12_v1(i)
```

```

p = p + 1
End If

j = j + 1
'If j > maxg1 Then
'  maxg1 = j
'End If

Next i

count = k + 1
i = 0
j = 0
k = 1

'Pinakas diadromwn_komwnn_visua2

p = Worksheets("visual2").Cells(2, 3).Value
j = 3
maxg2 = j
Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(2, k).Value = 1
  For i = 2 To 16
    If Worksheets("visual2").Cells(i, 3).Value = p Then
      Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, k).Value = ini_pop_B12_v2(i)
    Else
      j = 3
      k = k + 1
      p = p + 1
      Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(2, k).Value = p
      Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, k).Value = ini_pop_B12_v2(i)
    End If
    j = j + 1

```



```

'If j > maxg2 Then
'  maxg2 = j
'End If
Next i

i = 0
j = 0
p = 0
timek = 0
maxg = 2
k = 1
count3 = k - 1

'Pinakas diadromwn_komwnn_visual3

p = Worksheets("visual2").Cells(2, 3).Value
j = 3
maxg2 = j
Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(2, k).Value = 1
  For i = 2 To 16
    If Worksheets("visual3").Cells(i, 3).Value = p Then
      Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, k).Value = ini_pop_B13_v3(i)
    Else
      j = 3
      k = k + 1
      p = p + 1
      Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(2, k).Value = p
      Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, k).Value = ini_pop_B13_v3(i)
    End If
  
```

```
j = j + 1
'If j > maxg2 Then
'  maxg2 = j
'End If
```

```
Next i
```

```
'xronos_gia_koino_visual_12
```

```
For i = 2 To 16
```

```
  timek = 0
```

```
  p = Worksheets("common_routes12").Cells(i, 1).Value
```

```
  pos = Worksheets("common_routes12").Cells(i, 2).Value
```

```
  For j = 4 To 15
```

```
    a = Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j - 1, pos).Value
```

```
    b = Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, pos).Value
```

```
    If a = p Then
```

```
      'Worksheets("diadromes_komvoi").Cells(16 + maxg, 1) = pos
```

```
      Worksheets("common_routes12").Cells(i, 3) = 0
```

```
      Exit For
```

```
    End If
```

```
    If j > 3 Then
```

```
      timek = timek + Worksheets("times").Cells(a + 3, b + 2).Value + servicetime(19 + a)
```

```
    End If
```

```
    If b = p Then
```

```
      'Worksheets("diadromes_komvoi").Cells(16 + maxg, 1) = pos
```

```
      Worksheets("common_routes12").Cells(i, 3).Value = timek
```

```
      Exit For
```

```
End If
Next j
Next i
```

```
'xronos_gia_koino_visual2_12
```

```
mes = "OK"
```

```
mes2 = "NO"
```

```
mes3 = "-"
```

```
For i = 2 To 16
```

```
timek = 0
```

```
p = Worksheets("common_routes12").Cells(i, 1).Value
```

```
pos = Worksheets("common_routes12").Cells(i, 4).Value
```

```
For j = 4 To 15
```

```
    a = Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j - 1, pos).Value
```

```
    b = Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, pos).Value
```

```
    If a = p Then
```

```
        'Worksheets("diadromes_komvoi").Cells(16 + maxg, 1) = pos
```

```
        Worksheets("common_routes12").Cells(i, 5) = 0
```

```
    Exit For
```

```
    End If
```

```
    If j > 3 Then
```

```
        timek = timek + Worksheets("times2").Cells(a + 3, b + 2).Value + servicetime2(19 + a)
```

```
    End If
```

```
    If b = p Then
```

```
        'Worksheets("diadromes_komvoi").Cells(16 + maxg, 1) = pos
```

```
        Worksheets("common_routes12").Cells(i, 5).Value = timek
```

```
    Exit For
```

```

    End If
  Next j
Next i

'minima_gia_ikanopoihsh_xronou_enroute_12

For i = 2 To 16
  time1 = Worksheets("common_routes12").Cells(i, 3).Value
  time2 = Worksheets("common_routes12").Cells(i, 5).Value
  If Abs(time1 - time2) = 0 Then
    Worksheets("common_routes12").Cells(i, 6).Value = mes3
  ElseIf Abs(time1 - time2) > 0.08 Then
    Worksheets("common_routes12").Cells(i, 6).Value = mes2
  Else
    Worksheets("common_routes12").Cells(i, 6).Value = mes
  End If
Next i

```

.....

'xronos_gia_koino_visual_1_13

```

For i = 2 To 16
  timek = 0
  p = Worksheets("common_routes13").Cells(i, 1).Value
  pos = Worksheets("common_routes13").Cells(i, 2).Value

```

```

For j = 4 To 15
    a = Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j - 1, pos).Value
    b = Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, pos).Value
    If a = p Then
        'Worksheets("diadromes_komvoi").Cells(16 + maxg, 1) = pos
        Worksheets("common_routes13").Cells(i, 3) = 0
        Exit For
    End If
    If j > 3 Then
        timek = timek + Worksheets("times").Cells(a + 3, b + 2).Value + servicetime(19 + a)
    End If
    If b = p Then
        'Worksheets("diadromes_komvoi").Cells(16 + maxg, 1) = pos
        Worksheets("common_routes13").Cells(i, 3).Value = timek
        Exit For
    End If
Next j
Next i

```

```

'xronos_gia_koino_visual_3_l3

```

```

mes = "OK"

```

```

mes2 = "NO"

```

```

mes3 = "-"

```

```

For i = 2 To 16

```

```

    timek = 0

```

```

    p = Worksheets("common_routes13").Cells(i, 1).Value

```

```

    pos = Worksheets("common_routes13").Cells(i, 4).Value

```

```

    For j = 4 To 15

```

```

        a = Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j - 1, pos).Value

```

```

b = Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos).Value
If a = p Then
    'Worksheets("diadromes_komvoi").Cells(16 + maxg, 1) = pos
    Worksheets("common_routes13").Cells(i, 5) = 0
    Exit For
End If
If j > 3 Then
    timek = timek + Worksheets("times3").Cells(a + 3, b + 2).Value + servicetime3(19 + a)
End If
If b = p Then
    'Worksheets("diadromes_komvoi").Cells(16 + maxg, 1) = pos
    Worksheets("common_routes13").Cells(i, 5).Value = timek
    Exit For
End If
Next j
Next i

```

'minima_gia_ikanopoihsh_xronou_enroute_13

```

For i = 2 To 16
    time1 = Worksheets("common_routes13").Cells(i, 3).Value
    time2 = Worksheets("common_routes13").Cells(i, 5).Value
    If Abs(time1 - time2) = 0 Then
        Worksheets("common_routes13").Cells(i, 6).Value = mes3
    ElseIf Abs(time1 - time2) > 0.08 Then
        Worksheets("common_routes13").Cells(i, 6).Value = mes2
    Else
        Worksheets("common_routes13").Cells(i, 6).Value = mes
    End If
Next i

```

.....

'xronos_gia_koino_visual_2_23

For i = 2 To 16

timek = 0

p = Worksheets("common_routes23").Cells(i, 1).Value

pos = Worksheets("common_routes23").Cells(i, 2).Value

For j = 4 To 15

a = Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j - 1, pos).Value

b = Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, pos).Value

If a = p Then

'Worksheets("diadromes_komvoi").Cells(16 + maxg, 1) = pos

Worksheets("common_routes23").Cells(i, 3) = 0

Exit For

End If

If j > 3 Then

timek = timek + Worksheets("times").Cells(a + 3, b + 2).Value + servicetime2(19 + a)

End If

If b = p Then

'Worksheets("diadromes_komvoi").Cells(16 + maxg, 1) = pos

Worksheets("common_routes23").Cells(i, 3).Value = timek

Exit For

End If

Next j

Next i

'xronos_gia_koino_visual_3_23

mes = "OK"

mes2 = "NO"

mes3 = "-"

For i = 2 To 16

timek = 0

p = Worksheets("common_routes23").Cells(i, 1).Value

pos = Worksheets("common_routes23").Cells(i, 4).Value

For j = 4 To 15

a = Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j - 1, pos).Value

b = Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos).Value

If a = p Then

'Worksheets("diadromes_komvoi").Cells(16 + maxg, 1) = pos

Worksheets("common_routes23").Cells(i, 5) = 0

Exit For

End If

If j > 3 Then

timek = timek + Worksheets("times3").Cells(a + 3, b + 2).Value + servicetime3(19 + a)

End If

If b = p Then

'Worksheets("diadromes_komvoi").Cells(16 + maxg, 1) = pos

Worksheets("common_routes23").Cells(i, 5).Value = timek

Exit For

End If

Next j

Next i

'minima_gia_ikanopoihsh_xronou_enroute_23

For i = 2 To 16

time1 = Worksheets("common_routes23").Cells(i, 3).Value


```
time2 = Worksheets("common_routes23").Cells(i, 5).Value
If Abs(time1 - time2) = 0 Then
    Worksheets("common_routes23").Cells(i, 6).Value = mes3
Elseif Abs(time1 - time2) > 0.08 Then
    Worksheets("common_routes23").Cells(i, 6).Value = mes2
Else
    Worksheets("common_routes23").Cells(i, 6).Value = mes
End If
Next i
```

.....

```
End Sub
```

```
Sub total_cost_V12()
```

```
Dim k, i, j, a, b, c, pos, cap1, tot1, tot2, unse, w, module0, module1, totk1, totk2, totmeta, totalcost12, telikors1, telikors2, count, count2, extramod1, extramod2 As Integer
```

```
Dim pin1(15) As Integer
```

```
Dim pin2(15) As Integer
```

```
Dim pin3(15) As Integer
```

```
For m = 1 To 16
```

```
Sheet12.Cells(2, m).Value = ""
```

```
Sheet12.Cells(3, m).Value = ""
```

```
Sheet12.Cells(4, m).Value = ""
```

```
Sheet12.Cells(5, m).Value = ""
```

```
Sheet12.Cells(6, m).Value = ""  
Sheet12.Cells(7, m).Value = ""  
Sheet12.Cells(8, m).Value = ""  
Sheet12.Cells(9, m).Value = ""  
Sheet12.Cells(10, m).Value = ""  
Sheet12.Cells(11, m).Value = ""  
Sheet12.Cells(12, m).Value = ""  
Sheet12.Cells(13, m).Value = ""  
Sheet12.Cells(14, m).Value = ""  
Sheet12.Cells(15, m).Value = ""  
Sheet12.Cells(16, m).Value = ""
```

Next m

For i = 4 To 18

```
pin1(i - 3) = Worksheets("demand").Cells(i, 19).Value
```

```
pin2(i - 3) = Worksheets("demand").Cells(i, 20).Value
```

```
pin3(i - 3) = Worksheets("demand").Cells(i, 21).Value
```

Next i

```
extramod1 = 0
```

```
extramod2 = 0
```

```
pos = 0
```

```
a = 2
```

```
k = 1
```

```
j = 1
```

```
module0 = 1
```

```
j = 2
```

```
i = 1
```

```
b = 0
```

```
cap1 = Worksheets("common_routes12").Cells(18, 2).Value
```

```
'prin ton koino V1
```

```
a = 2
```

```
For i = 2 To 16
```

```
    j = 3
```

```
    module0 = 1
```

```
    unse = 0
```

```
    tot1 = 0
```

```
    tot2 = 0
```

```
    If Worksheets("common_routes12").Cells(i, 6).Value = "OK" Then
```

```
        k = Worksheets("common_routes12").Cells(i, 2).Value
```

```
        Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 2).Value = k
```

```
        pos = Worksheets("common_routes12").Cells(i, 4).Value
```

```
        Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 3).Value = pos
```

```
        b = Worksheets("common_routes12").Cells(i, 1).Value
```

```
        Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 1).Value = b
```

```
        While Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k).Value <> b
```

```
            tot1 = tot1 + pin1(Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k).Value) +  
pin2(Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k).Value)
```

```
        If cap1 > tot1 Then
```

```
            unse = 0
```

```
            'Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 5) = 0
```

```
        Elseif cap1 = tot1 Then
```

```
            unse = 0
```

```

        Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 5) = 0
    ElseIf cap1 < tot1 Then
        unse = tot1 - cap1
        Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 5) = unse
    End If
    j = j + 1
Wend
Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 5) = unse
w = unse / cap1
If w > 0 Then
    If module0 < 2 Then
        module0 = module0 + 1
    End If
End If
Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 4).Value = module0
a = a + 1
End If
Next i
totk1 = 0
a = 0

'prin ton koino V2
a = 2
For i = 2 To 16
    j = 3
    module0 = 1
    unse = 0
    tot1 = 0
    tot2 = 0
    If Worksheets("common_routes12").Cells(i, 6).Value = "OK" Then
        j = 3

```

```

k = Worksheets("common_routes12").Cells(i, 2).Value
pos = Worksheets("common_routes12").Cells(i, 4).Value
b = Worksheets("common_routes12").Cells(i, 1).Value
While Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, pos).Value <> b
    tot2 = tot2 + pin1(Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, pos).Value) +
pin2(Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, pos).Value)
    If cap1 > tot2 Then
        unse = 0
        'Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 5) = 0
    ElseIf cap1 = tot2 Then
        unse = 0
        'Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 5) = 0
    ElseIf cap1 < tot2 Then
        unse = tot2 - cap1
        'Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 5) = unse
    End If
    j = j + 1
Wend
Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 7) = unse
w = unse / cap1
If w > 0 Then
    If module0 < 2 Then
        module0 = module0 + 1
    End If
End If
Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 6).Value = module0
If module0 + Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 4).Value < 4 Then
    Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 16).Value = "OK"
Else
    Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 16).Value = "-"
End If

```

```

        a = a + 1
    End If
Next i
totk1 = 0
a = 0

'ston koino
a = 2
For i = 2 To 16
    j = 3
    module0 = 1
    unse = 0
    tot1 = 0
    totk1 = 0
    totk2 = 0
    tot2 = 0
    If Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 16).Value = "OK" Then
        j = 3
        k = Worksheets("common_routes12").Cells(i, 2).Value
        pos = Worksheets("common_routes12").Cells(i, 4).Value
        b = Worksheets("common_routes12").Cells(i, 1).Value
        While Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k).Value <> b
            tot1 = tot1 + pin1(Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k).Value)
            totk1 = totk1 + pin2(Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k).Value)
            j = j + 1
        Wend
        j = 3
        While Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, pos).Value <> b
            tot2 = tot2 + pin1(Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, pos).Value)
            totk2 = totk2 + pin2(Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, pos).Value)
            j = j + 1
        End While
    End If
Next i

```

```
Wend  
Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 8) = tot1 + tot2 + pin1(b)  
Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 9) = totk1 + totk2 + pin2(b)  
End If  
a = a + 1  
Next i
```

'meta ton koino

```
For i = 2 To 16  
    extramod1 = 0  
    extramod2 = 0  
    j = 3  
    k = Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 2).Value  
    If IsEmpty(k) Then  
        Exit For  
    End If  
    While Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 16).Value <> "OK"  
        i = i + 1  
        k = Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 2).Value  
        If IsEmpty(k) Then  
            Exit For  
        End If  
    Wend  
    k = Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 2).Value  
    If IsEmpty(k) Then  
        Exit For  
    End If  
  
    pos = Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 3).Value  
    b = Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 1).Value
```

```

tot1 = Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 8).Value
w = (tot1 / cap1)
module0 = -Int(-w)
Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 10).Value = module0
tot1 = tot1 - pin1(b)
tot2 = Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 9).Value
w = tot2 / cap1
module1 = -Int(-w)
Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 11).Value = module1
tot2 = tot2 - pin2(b)

```

'Unservd RS1_extramod1

```

While Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k).Value <> b
    j = j + 1
Wend
While Not IsEmpty(Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k))
    tot1 = tot1 + pin1(Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k))
    j = j + 1
Wend
j = 3

If module0 * cap1 > tot1 Then
    unse = 0
Elseif module0 * cap1 = tot1 Then
    unse = 0
Elseif module0 * cap1 < tot1 Then
    unse = tot1 - module0 * cap1
End If
Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 12).Value = unse

```



```

w = unse / cap1
w = -Int(-w)
If w > 0 Then
    extramod1 = extramod1 + w
End If
Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 13).Value = extramod1
j = 3

' Unserved RS2_extramod2

While Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, pos).Value <> b
    j = j + 1
Wend
While Not IsEmpty(Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, pos))
    tot2 = tot2 + pin2(Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, pos))
    j = j + 1
Wend
If module1 * cap1 > tot2 Then
    unse = 0
Elseif module1 * cap1 = tot2 Then
    unse = 0
Elseif module1 * cap1 < tot2 Then
    unse = tot2 - module1 * cap1
End If
Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 14).Value = unse
w = unse / cap1
w = -Int(-w)
If w > 0 Then
    extramod2 = extramod2 + w
End If
Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 15).Value = extramod2

```

Next i

'telikh synarthsh kostous

i = 2

totk1 = 0

totk2 = 0

While Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 16).Value = "OK" Or
Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 16).Value = "-"

 module0 = 0

 module1 = 0

 tot1 = 0

 tot2 = 0

 While Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 16).Value = "-" And Not
 IsEmpty(Worksheets("totalcost_12").Cells(i + 1, 16))

 i = i + 1

 Wend

 module0 = Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 3).Value

 module1 = Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 6).Value

 k = Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 2).Value

 b = Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 1).Value

 pos = Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 3).Value

 j = 3

 While Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k) <> b

 Debug.Print a

 a = Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k).Value

 c = Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j + 1, k).Value

 tot1 = tot1 + Worksheets("distances").Cells(a + 3, c + 2).Value

```

    j = j + 1
Wend

totk1 = totk1 + module0 * tot1

j = 3
While Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, pos) <> b
    a = Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, pos).Value
    c = Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j + 1, pos).Value
    tot2 = tot2 + Worksheets("distances2").Cells(a + 3, c + 2).Value
    j = j + 1
Wend

totk2 = totk2 + tot2 * module1

i = i + 1
Wend

i = 2

While Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 16).Value = "OK" Or
Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 16).Value = "-"

    module0 = 0
    module1 = 0
    tot1 = 0
    tot2 = 0

    While Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 16).Value = "-" And Not
IsEmpty(Worksheets("totalcost_12").Cells(i + 1, 16))

        i = i + 1
    Wend

    module0 = Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 10).Value +
Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 13).Value

    module1 = Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 11).Value +
Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 15).Value

```

```

k = Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 2).Value
b = Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 1).Value
pos = Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 3).Value
j = 3
While Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k) <> b
    j = j + 1
Wend
While Not IsEmpty(Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j + 1, k))
    a = Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k).Value
    c = Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j + 1, k).Value
    tot1 = tot1 + Worksheets("distances").Cells(a + 3, c + 2).Value
    j = j + 1
Wend
telikors1 = Worksheets("distances").Cells(3 + Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j,
k), 18)
j = 3
While Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, pos) <> b
    j = j + 1
Wend
While Not IsEmpty(Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j + 1, pos))
    a = Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, pos).Value
    c = Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j + 1, pos).Value
    tot2 = tot2 + Worksheets("distances2").Cells(a + 3, c + 2).Value
    j = j + 1
Wend
telikors2 = Worksheets("distances2").Cells(3 + Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j,
pos), 18)
totmeta = tot1 * module0 + tot2 * module1 + telikors1 * module0 + telikors2 * module1
i = i + 1
Wend

totmeta = totmeta + totk1 + totk2

```

tot1 = 0

i = 2

tot2 = 0

While Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 16).Value = "OK" Or

Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 16).Value = "-"

 module0 = 0

 module1 = 0

 While Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 16).Value = "-" And Not
 IsEmpty(Worksheets("totalcost_12").Cells(i + 1, 16))

 i = i + 1

 Wend

 tot1 = tot1 + Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 12).Value +
Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 14).Value + Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 5).Value
+ Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 7).Value

 i = i + 1

Wend

i = 2

While Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 16).Value = "OK" Or

Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 16).Value = "-"

 module0 = 0

 module1 = 0

 While Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 16).Value = "-" And Not
 IsEmpty(Worksheets("totalcost_12").Cells(i + 1, 16))

 i = i + 1

 Wend

 tot2 = tot2 + Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 10).Value +
Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 11).Value + Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 13).Value
+ Worksheets("totalcost_12").Cells(i, 15).Value

 i = i + 1

Wend

totalcost12 = totmeta * 1.2 + 1 * 1 * tot1 + 800 * 0.001 * tot2

Sheet4.Cells(25, 5).Value = totalcost12

Sheet4.Cells(33, 5).Value = tot1

End Sub

Sub total_cost_V13()

Dim k, i, j, a, b, c, pos, cap1, tot1, tot2, unse, w, module0, module1, totk1, totk2, totmeta, totalcost12, telikors1, telikors2, count, count2, extramod1, extramod2 As Integer

Dim pin1(15) As Integer

Dim pin2(15) As Integer

Dim pin3(15) As Integer

For m = 1 To 16

Sheet9.Cells(2, m).Value = ""

Sheet9.Cells(3, m).Value = ""

Sheet9.Cells(4, m).Value = ""

Sheet9.Cells(5, m).Value = ""

Sheet9.Cells(6, m).Value = ""

Sheet9.Cells(7, m).Value = ""

Sheet9.Cells(8, m).Value = ""

Sheet9.Cells(9, m).Value = ""

Sheet9.Cells(10, m).Value = ""

Sheet9.Cells(11, m).Value = ""

Sheet9.Cells(12, m).Value = ""

Sheet9.Cells(13, m).Value = ""

Sheet9.Cells(14, m).Value = ""

Sheet9.Cells(15, m).Value = ""

Sheet9.Cells(16, m).Value = ""

Next m

For i = 4 To 18

pin1(i - 3) = Worksheets("demand").Cells(i, 19).Value

pin2(i - 3) = Worksheets("demand").Cells(i, 20).Value

pin3(i - 3) = Worksheets("demand").Cells(i, 21).Value

Next i

extramod1 = 0

extramod2 = 0

pos = 0

a = 2

k = 1

j = 1

module0 = 1

j = 2

i = 1

b = 0

cap1 = Worksheets("common_routes13").Cells(18, 2).Value

'prin ton koino V1

a = 2

For i = 2 To 16

```

j = 3
module0 = 1
unse = 0
tot1 = 0
tot2 = 0
If Worksheets("common_routes13").Cells(i, 6).Value = "OK" Then
    k = Worksheets("common_routes13").Cells(i, 2).Value
    Worksheets("totalcost_13").Cells(a, 2).Value = k
    pos = Worksheets("common_routes13").Cells(i, 4).Value
    Worksheets("totalcost_13").Cells(a, 3).Value = pos
    b = Worksheets("common_routes13").Cells(i, 1).Value
    Worksheets("totalcost_13").Cells(a, 1).Value = b
    While Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k).Value <> b
        tot1 = tot1 + pin1(Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k).Value) +
pin3(Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k).Value)
        If cap1 > tot1 Then
            unse = 0
            'Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 5) = 0
        ElseIf cap1 = tot1 Then
            unse = 0
            'Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 5) = 0
        ElseIf cap1 < tot1 Then
            unse = tot1 - cap1
            'Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 5) = unse
        End If
        j = j + 1
    Wend
    Worksheets("totalcost_13").Cells(a, 5) = unse
    w = unse / cap1
    If w > 0 Then
        If module0 < 2 Then

```



```

        module0 = module0 + 1
    End If
End If
Worksheets("totalcost_13").Cells(a, 4).Value = module0
a = a + 1
End If
Next i
totk1 = 0
a = 0

'prin ton koino V3
a = 2
For i = 2 To 16
    j = 3
    module0 = 1
    unse = 0
    tot1 = 0
    tot2 = 0
    If Worksheets("common_routes13").Cells(i, 6).Value = "OK" Then
        j = 3
        k = Worksheets("common_routes13").Cells(i, 2).Value

        pos = Worksheets("common_routes13").Cells(i, 4).Value
        b = Worksheets("common_routes13").Cells(i, 1).Value

        While Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos).Value <> b
            tot2 = tot2 + pin1(Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos).Value) +
pin3(Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos).Value)
        End While
        If cap1 > tot2 Then

```

```

    unse = 0
    'Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 5) = 0
Elseif cap1 = tot2 Then
    unse = 0
    'Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 5) = 0
Elseif cap1 < tot2 Then
    unse = tot2 - cap1
    'Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 5) = unse
End If
j = j + 1
Wend
Worksheets("totalcost_13").Cells(a, 7) = unse
w = unse / cap1
If w > 0 Then
    If module0 < 2 Then
        module0 = module0 + 1
    End If
End If
Worksheets("totalcost_13").Cells(a, 6).Value = module0
If module0 + Worksheets("totalcost_13").Cells(a, 4).Value < 4 Then
    Worksheets("totalcost_13").Cells(a, 16).Value = "OK"
Else
    Worksheets("totalcost_13").Cells(a, 16).Value = "-"
End If
a = a + 1
End If
Next i
totk1 = 0
a = 0

'ston koino

```

```

a = 2
For i = 2 To 16
  j = 3
  module0 = 1
  unse = 0
  tot1 = 0
  totk1 = 0
  totk2 = 0
  tot2 = 0
  If Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 16).Value = "OK" Then
    j = 3
    k = Worksheets("common_routes13").Cells(i, 2).Value
    pos = Worksheets("common_routes13").Cells(i, 4).Value
    b = Worksheets("common_routes13").Cells(i, 1).Value
    While Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k).Value <> b
      tot1 = tot1 + pin1(Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k).Value)
      totk1 = totk1 + pin3(Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k).Value)
      j = j + 1
    Wend
    j = 3
    While Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos).Value <> b
      tot2 = tot2 + pin1(Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos).Value)
      totk2 = totk2 + pin3(Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos).Value)
      j = j + 1
    Wend
    Worksheets("totalcost_13").Cells(a, 8) = tot1 + tot2 + pin1(b)
    Worksheets("totalcost_13").Cells(a, 9) = totk1 + totk2 + pin3(b)
  End If
  a = a + 1
Next i

```

'meta ton koino

For i = 2 To 16

extramod1 = 0

extramod2 = 0

j = 3

k = Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 2).Value

If IsEmpty(k) Then

Exit For

End If

While Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 16).Value <> "OK"

i = i + 1

k = Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 2).Value

If IsEmpty(k) Then

Exit For

End If

Wend

k = Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 2).Value

If IsEmpty(k) Then

Exit For

End If

pos = Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 3).Value

b = Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 1).Value

tot1 = Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 8).Value

w = (tot1 / cap1)

module0 = -Int(-w)

Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 10).Value = module0

tot1 = tot1 - pin1(b)

tot2 = Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 9).Value

w = tot2 / cap1

```

module1 = -Int(-w)
Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 11).Value = module1
tot2 = tot2 - pin3(b)

'Unservd RS1_extramod1

While Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k).Value <> b
    j = j + 1
Wend
While Not IsEmpty(Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k))
    tot1 = tot1 + pin1(Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k))
    j = j + 1
Wend

If module0 * cap1 > tot1 Then
    unse = 0
Elseif module0 * cap1 = tot1 Then
    unse = 0
Elseif module0 * cap1 < tot1 Then
    unse = tot1 - module0 * cap1
End If
Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 12).Value = unse
w = unse / cap1
w = -Int(-w)
If w > 0 Then
    extramod1 = extramod1 + w
End If
Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 13).Value = extramod1
j = 3

' Unservd RS3_extramod2

```

```

While Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos).Value <> b
    j = j + 1
Wend

While Not IsEmpty(Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos))
    tot2 = tot2 + pin3(Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos))
    j = j + 1
Wend

```

```

If module1 * cap1 > tot2 Then
    unse = 0
Elseif module1 * cap1 = tot2 Then
    unse = 0
Elseif module1 * cap1 < tot2 Then
    unse = tot2 - module1 * cap1
End If

Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 14).Value = unse

w = unse / cap1
w = -Int(-w)

If w > 0 Then
    extramod2 = extramod2 + w
End If

Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 15).Value = extramod2

```

```
Next i
```

```
'telikh synarthsh kostous
```

```
i = 2
```

```
totk1 = 0
```

```
totk2 = 0
```

```

While Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 16).Value = "OK" Or
Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 16).Value = "-"

    module0 = 0

    module1 = 0

    tot1 = 0

    tot2 = 0

    While Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 16).Value = "-" And Not
IsEmpty(Worksheets("totalcost_13").Cells(i + 1, 16))

        i = i + 1

    Wend

    module0 = Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 3).Value
    module1 = Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 6).Value
    k = Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 2).Value
    b = Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 1).Value
    pos = Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 3).Value

    j = 3

    While Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k) <> b
        a = Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k).Value
        c = Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j + 1, k).Value
        tot1 = tot1 + Worksheets("distances").Cells(a + 3, c + 2).Value
        j = j + 1
    Wend

    totk1 = totk1 + module0 * tot1

    j = 3

    While Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos) <> b
        a = Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos).Value
        c = Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j + 1, pos).Value
        tot2 = tot2 + Worksheets("distances3").Cells(a + 3, c + 2).Value
        j = j + 1
    Wend

    totk2 = totk2 + tot2 * module1

```

```

    i = i + 1
Wend

i = 2
totk1 = 0
totk2 = 0
While Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 16).Value = "OK" Or
Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 16).Value = "-"
    module0 = 0
    module1 = 0
    tot1 = 0
    tot2 = 0
    While Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 16).Value = "-" And Not
IsEmpty(Worksheets("totalcost_13").Cells(i + 1, 16))
        i = i + 1
    Wend
    module0 = Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 10).Value +
Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 13).Value
    module1 = Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 11).Value +
Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 15).Value
    k = Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 2).Value
    b = Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 1).Value
    pos = Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 3).Value
    j = 3
    While Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k) <> b
        j = j + 1
    Wend
    While Not IsEmpty(Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j + 1, k))
        a = Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j, k).Value
        c = Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j + 1, k).Value
        tot1 = tot1 + Worksheets("distances").Cells(a + 3, c + 2).Value

```



```

    j = j + 1
Wend

telikors1 = Worksheets("distances").Cells(3 + Worksheets("diadromes_komvoi1").Cells(j,
k), 18)

j = 3
While Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos) <> b
    j = j + 1
Wend

While Not IsEmpty(Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j + 1, pos))
    a = Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos).Value
    c = Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j + 1, pos).Value
    tot2 = tot2 + Worksheets("distances3").Cells(a + 3, c + 2).Value
    j = j + 1
Wend

telikors2 = Worksheets("distances3").Cells(3 + Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j,
pos), 18)

totmeta = tot1 * module0 + tot2 * module1 + telikors1 * module0 + telikors2 * module1
i = i + 1
Wend

totmeta = totmeta + totk1 + totk2
tot1 = 0
i = 2
tot2 = 0
While Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 16).Value = "OK" Or
Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 16).Value = "-"
    module0 = 0
    module1 = 0
    While Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 16).Value = "-" And Not
IsEmpty(Worksheets("totalcost_13").Cells(i + 1, 16))
        i = i + 1
    Wend

```

```
tot1 = tot1 + Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 12).Value +  
Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 14).Value + Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 5).Value  
+ Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 7).Value
```

```
i = i + 1
```

```
Wend
```

```
i = 2
```

```
While Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 16).Value = "OK" Or  
Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 16).Value = "-"
```

```
module0 = 0
```

```
module1 = 0
```

```
While Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 16).Value = "-" And Not  
IsEmpty(Worksheets("totalcost_13").Cells(i + 1, 16))
```

```
i = i + 1
```

```
Wend
```

```
tot2 = tot2 + Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 10).Value +  
Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 11).Value + Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 13).Value  
+ Worksheets("totalcost_13").Cells(i, 15).Value
```

```
i = i + 1
```

```
Wend
```

```
totalcost12 = totmeta * 1.2 + 1 * 1 * tot1 + 800 * 0.001 * tot2
```

```
Sheet4.Cells(27, 5).Value = totalcost12
```

```
Sheet4.Cells(34, 5).Value = tot1
```

```
End Sub
```

```
Sub total_cost_V23()
```

```
Dim k, i, j, a, b, c, pos, cap1, tot1, tot2, unse, w, module0, module1, totk1, totk2, totmeta,  
totalcost12, telikors1, telikors2, count, count2, extramod1, extramod2 As Integer
```

```
Dim pin1(15) As Integer
```

```
Dim pin2(15) As Integer
```

```
Dim pin3(15) As Integer
```

```
For m = 1 To 16
```

```
Sheet11.Cells(2, m).Value = ""
```

```
Sheet11.Cells(3, m).Value = ""
```

```
Sheet11.Cells(4, m).Value = ""
```

```
Sheet11.Cells(5, m).Value = ""
```

```
Sheet11.Cells(6, m).Value = ""
```

```
Sheet11.Cells(7, m).Value = ""
```

```
Sheet11.Cells(8, m).Value = ""
```

```
Sheet11.Cells(9, m).Value = ""
```

```
Sheet11.Cells(10, m).Value = ""
```

```
Sheet11.Cells(11, m).Value = ""
```

```
Sheet11.Cells(12, m).Value = ""
```

```
Sheet11.Cells(13, m).Value = ""
```

```
Sheet11.Cells(14, m).Value = ""
```

```
Sheet11.Cells(15, m).Value = ""
```

```
Sheet11.Cells(16, m).Value = ""
```

```
Next m
```

```
For i = 4 To 18
```

```
pin1(i - 3) = Worksheets("demand").Cells(i, 19).Value
```

```
pin2(i - 3) = Worksheets("demand").Cells(i, 20).Value
```

```
pin3(i - 3) = Worksheets("demand").Cells(i, 21).Value
```

```
Next i
```

extramod1 = 0

extramod2 = 0

pos = 0

a = 2

k = 1

j = 1

module0 = 1

j = 2

i = 1

b = 0

cap1 = Worksheets("common_routes23").Cells(18, 2).Value

'prin ton koino V2

a = 2

For i = 2 To 16

 j = 3

 module0 = 1

 unse = 0

 tot1 = 0

 tot2 = 0

 If Worksheets("common_routes23").Cells(i, 6).Value = "OK" Then

 k = Worksheets("common_routes23").Cells(i, 2).Value

 Worksheets("totalcost_23").Cells(a, 2).Value = k

```

pos = Worksheets("common_routes23").Cells(i, 4).Value
Worksheets("totalcost_23").Cells(a, 3).Value = pos
b = Worksheets("common_routes23").Cells(i, 1).Value
Worksheets("totalcost_23").Cells(a, 1).Value = b
While Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, k).Value <> b
    tot1 = tot1 + pin2(Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, k).Value) +
pin3(Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, k).Value)
    If cap1 > tot1 Then
        unse = 0
        'Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 5) = 0
    ElseIf cap1 = tot1 Then
        unse = 0
        'Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 5) = 0
    ElseIf cap1 < tot1 Then
        unse = tot1 - cap1
        'Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 5) = unse
    End If
    j = j + 1
Wend
Worksheets("totalcost_23").Cells(a, 5) = unse
w = unse / cap1
If w > 0 Then
    If module0 < 2 Then
        module0 = module0 + 1
    End If
End If
Worksheets("totalcost_23").Cells(a, 4).Value = module0
a = a + 1
End If
Next i
totk1 = 0

```

a = 0

'prin ton koino V3

a = 2

For i = 2 To 16

 j = 3

 module0 = 1

 unse = 0

 tot1 = 0

 tot2 = 0

 If Worksheets("common_routes23").Cells(i, 6).Value = "OK" Then

 j = 3

 k = Worksheets("common_routes23").Cells(i, 2).Value

 pos = Worksheets("common_routes23").Cells(i, 4).Value

 b = Worksheets("common_routes23").Cells(i, 1).Value

 While Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos).Value <> b

 tot2 = tot2 + pin2(Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos).Value) +
pin3(Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos).Value)

 If cap1 > tot2 Then

 unse = 0

 'Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 5) = 0

 Elseif cap1 = tot2 Then

 unse = 0

 'Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 5) = 0

 Elseif cap1 < tot2 Then

 unse = tot2 - cap1

 'Worksheets("totalcost_12").Cells(a, 5) = unse

 End If

 j = j + 1

```

Wend
Worksheets("totalcost_23").Cells(a, 7) = unse
w = unse / cap1
If w > 0 Then
    If module0 < 2 Then
        module0 = module0 + 1
    End If
End If
Worksheets("totalcost_23").Cells(a, 6).Value = module0
If module0 + Worksheets("totalcost_23").Cells(a, 4).Value < 4 Then
    Worksheets("totalcost_23").Cells(a, 16).Value = "OK"
Else
    Worksheets("totalcost_23").Cells(a, 16).Value = "-"
End If
a = a + 1
End If
Next i
totk1 = 0
a = 0

'ston koino
a = 2
For i = 2 To 16
    j = 3
    module0 = 1
    unse = 0
    tot1 = 0
    totk1 = 0
    totk2 = 0
    tot2 = 0
    If Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 16).Value = "OK" Then

```

```

j = 3
k = Worksheets("common_routes23").Cells(i, 2).Value
pos = Worksheets("common_routes23").Cells(i, 4).Value
b = Worksheets("common_routes23").Cells(i, 1).Value
While Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, k).Value <> b
    tot1 = tot1 + pin2(Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, k).Value)
    totk1 = totk1 + pin3(Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, k).Value)
    j = j + 1
Wend
j = 3
While Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos).Value <> b
    tot2 = tot2 + pin2(Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos).Value)
    totk2 = totk2 + pin3(Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos).Value)
    j = j + 1
Wend
Worksheets("totalcost_23").Cells(a, 8) = tot1 + tot2 + pin2(b)
Worksheets("totalcost_23").Cells(a, 9) = totk1 + totk2 + pin3(b)
End If
a = a + 1
Next i

```

'meta ton koino

```

For i = 2 To 16
    extramod1 = 0
    extramod2 = 0
    j = 3
    k = Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 2).Value
    If IsEmpty(k) Then
        Exit For
    End If

```



```

End If
While Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 16).Value <> "OK"
    i = i + 1
    k = Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 2).Value
    If IsEmpty(k) Then
        Exit For
    End If
Wend
k = Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 2).Value
If IsEmpty(k) Then
    Exit For
End If
pos = Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 3).Value
b = Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 1).Value
tot1 = Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 8).Value
w = (tot1 / cap1)
module0 = -Int(-w)
Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 10).Value = module0
tot1 = tot1 - pin2(b)
tot2 = Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 9).Value
w = tot2 / cap1
module1 = -Int(-w)
Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 11).Value = module1
tot2 = tot2 - pin3(b)

'Unservd RS1_extramod1

While Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, k).Value <> b
    j = j + 1
Wend
While Not IsEmpty(Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, k))

```

```

    tot1 = tot1 + pin2(Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, k))
    j = j + 1
Wend

If module0 * cap1 > tot1 Then
    unse = 0
Elseif module0 * cap1 = tot1 Then
    unse = 0
Elseif module0 * cap1 < tot1 Then
    unse = tot1 - module0 * cap1
End If

Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 12).Value = unse
w = unse / cap1
w = -Int(-w)
If w > 0 Then
    extramod1 = extramod1 + w
End If

Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 13).Value = extramod1
j = 3

' Unserved RS3_extramod2

While Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos).Value <> b
    j = j + 1
Wend

While Not IsEmpty(Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos))
    tot2 = tot2 + pin3(Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos))
    j = j + 1
Wend

If module1 * cap1 > tot2 Then
    unse = 0

```

```

Elseif module1 * cap1 = tot2 Then
    unse = 0
Elseif module1 * cap1 < tot2 Then
    unse = tot2 - module1 * cap1
End If
Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 14).Value = unse
w = unse / cap1
w = -Int(-w)
If w > 0 Then
    extramod2 = extramod2 + w
End If
Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 15).Value = extramod2

Next i

'telikh synarthsh kostous

i = 2
totk1 = 0
totk2 = 0
While Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 16).Value = "OK" Or
Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 16).Value = "-"
    module0 = 0
    module1 = 0
    tot1 = 0
    tot2 = 0
    While Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 16).Value = "-" And Not
IsEmpty(Worksheets("totalcost_23").Cells(i + 1, 16))
        i = i + 1
    Wend
    module0 = Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 3).Value

```

```

module1 = Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 6).Value
k = Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 2).Value
b = Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 1).Value
pos = Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 3).Value
j = 3
While Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, k) <> b
    a = Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, k).Value
    c = Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j + 1, k).Value
    tot1 = tot1 + Worksheets("distances2").Cells(a + 3, c + 2).Value
    j = j + 1
Wend
totk1 = totk1 + module0 * tot1

j = 3
While Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos) <> b
    a = Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos).Value
    c = Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j + 1, pos).Value
    tot2 = tot2 + Worksheets("distances3").Cells(a + 3, c + 2).Value
    j = j + 1
Wend
totk2 = totk2 + tot2 * module1
i = i + 1
Wend

i = 2

While (Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 16).Value = "OK" Or
Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 16).Value = "-")
    module0 = 0
    module1 = 0

```

```

tot1 = 0

tot2 = 0

While Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 16).Value = "-" And Not
IsEmpty(Worksheets("totalcost_23").Cells(i + 1, 16))

    i = i + 1

Wend

module0 = Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 10).Value +
Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 13).Value

module1 = Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 11).Value +
Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 15).Value

k = Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 2).Value

b = Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 1).Value

pos = Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 3).Value

j = 3

While Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, k) <> b

    j = j + 1

Wend

While Not IsEmpty(Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j + 1, k))

    a = Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j, k).Value

    c = Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j + 1, k).Value

    tot1 = tot1 + Worksheets("distances2").Cells(a + 3, c + 2).Value

    j = j + 1

Wend

telikors1 = Worksheets("distances2").Cells(3 + Worksheets("diadromes_komvoi2").Cells(j,
k), 18)

j = 3

While Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos) <> b

    j = j + 1

Wend

While Not IsEmpty(Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j + 1, pos))

    a = Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j, pos).Value

    c = Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j + 1, pos).Value

```

```

    tot2 = tot2 + Worksheets("distances3").Cells(a + 3, c + 2).Value
    j = j + 1
Wend

    telikors2 = Worksheets("distances3").Cells(3 + Worksheets("diadromes_komvoi3").Cells(j,
pos), 18)

    totmeta = tot1 * module0 + tot2 * module1 + telikors1 * module0 + telikors2 * module1
    i = i + 1
Wend

```

```

totmeta = totmeta + totk1 + totk2

```

```

tot1 = 0

```

```

i = 2

```

```

tot2 = 0

```

```

While Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 16).Value = "OK" Or
Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 16).Value = "-"

```

```

    module0 = 0

```

```

    module1 = 0

```

```

    While Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 16).Value = "-" And Not
IsEmpty(Worksheets("totalcost_23").Cells(i + 1, 16))

```

```

        i = i + 1

```

```

    Wend

```

```

    tot1 = tot1 + Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 12).Value +
Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 14).Value + Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 5).Value
+ Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 7).Value

```

```

    i = i + 1

```

```

Wend

```

```

i = 2

```

```

While Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 16).Value = "OK" Or
Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 16).Value = "-"

```

module0 = 0

module1 = 0

While Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 16).Value = "-" And Not
IsEmpty(Worksheets("totalcost_23").Cells(i + 1, 16))

 i = i + 1

Wend

 tot2 = tot2 + Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 10).Value +
Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 11).Value + Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 13).Value
+ Worksheets("totalcost_23").Cells(i, 15).Value

 i = i + 1

Wend

Telos:

totalcost12 = totmeta * 1.2 + 1 * 1 * tot1 + 800 * 0.001 * tot2

Sheet4.Cells(29, 5).Value = totalcost12

Sheet4.Cells(35, 5).Value = tot1

End Sub