

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

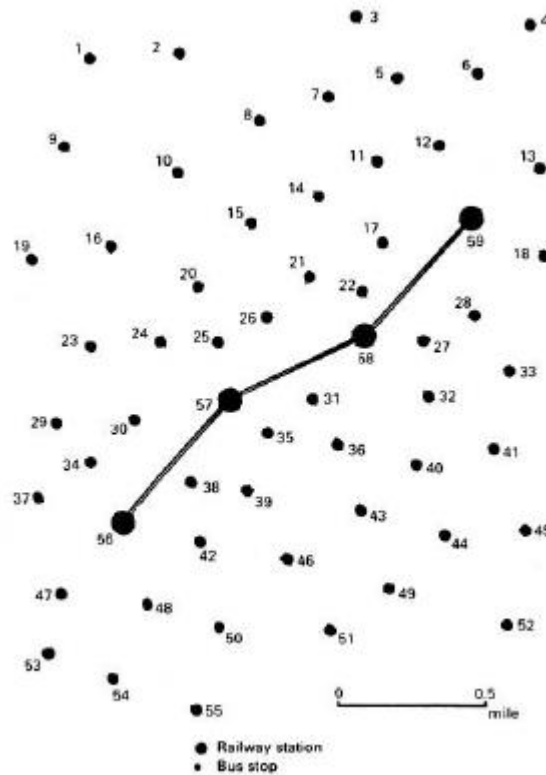
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕ ΣΤΟΛΟ
ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΛΕΩΦΟΡΕΙΩΝ»



Θεόφιλος Φάκας

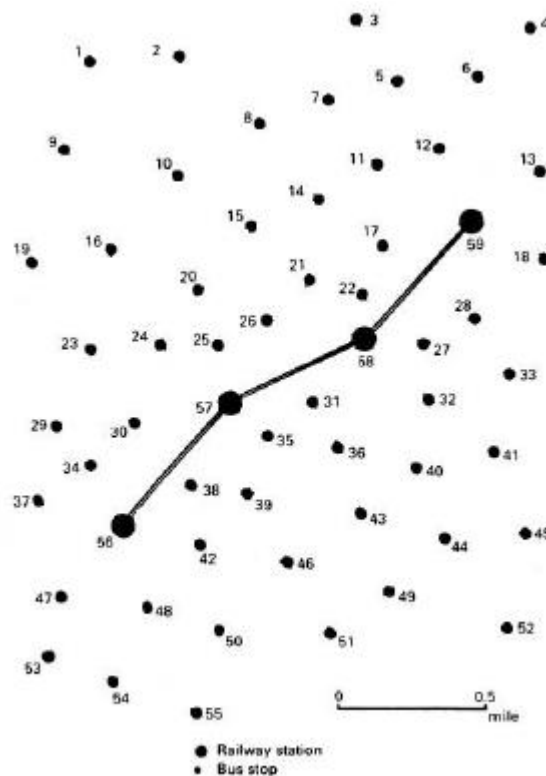
Επιβλέπων Καθηγητής: Κωνσταντίνος Κεπατσόγλου

Αθήνα, Οκτώβριος 2020



DIPLOMA THESIS

«OPTIMAL DESIGN OF FEEDER BUS NETWORK WITH AUTONOMOUS BUSES»



Theofilos Fakas

Supervisor Professor: Konstantinos Kepaptsoglou

Athens, October 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Κύριο και Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ Κωνσταντίνο Κεπαπτσόγλου που μου ανέθεσε τη διπλωματική αυτή εργασία, το θέμα της οποίας αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στον τομέα των Συγκοινωνιακών.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την Υποψήφια Διδάκτορα της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ Χριστίνα Ηλιοπούλου για την πολύτιμη βοήθεια της που μου προσέφερε και τη διαρκή συνεργασία που είχαμε κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Ένα ευχαριστώ στους φίλους μου και τους συμφοιτητές μου που στάθηκαν δίπλα μου κατά τη διάρκεια της φοιτητικής μου πορείας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου που με βοήθησε αυτά τα χρόνια να αποπερατώσω τις σπουδές μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο «βέλτιστος σχεδιασμός δικτύου με τροφοδοτικά αυτόνομα λεωφορεία», που έχει ως στόχο την άμεση εξυπηρέτηση της ζήτησης σε πολλαπλούς σταθμούς μετρό από πολλαπλές προελεύσεις. Το πρόβλημα αυτό αποτελεί ένα εξιδεικευμένο πρόβλημα του ευρύτερου προβλήματος του σχεδιασμού των αστικών συγκοινωνιών και έχει το πρότυπο του προβλήματος της δρομολόγησης των οχημάτων . Η μεθοδολογία που θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του προβλήματος στηρίζεται στα συστήματα των «Αυτόματων Ανταποκρινόμενων Μεταφορών στη Ζήτηση», που έχουν ως στόχο την μεταφορά όλων των επιβατών στους σιδηροδρομικούς σταθμούς της περιοχής εξυπηρέτησης από έναν ομοιογενή στόλο μικρών αυτόνομων λεωφορείων. Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε ένας Γενετικός Αλγόριθμος, ο οποίος έδωσε πολύ καλά αποτελέσματα σε σύντομο χρονικό διάστημα και μέσω του οποίου δημιουργήθηκαν οι κατάλληλες διαδρομές που εξυπηρετούν τη ζήτηση με το ελάχιστο κόστος μεταφοράς.

Λέξεις Κλειδιά: Δίκτυο Τροφοδοτικών Λεωφορείων, Αυτόνομα Λεωφορεία, Αυτόματη Ανταποκρινόμενη Μεταφορά στη Ζήτηση, Γενετικός Αλγόριθμος, Διαδρομές Λεωφορείων, Μεταφορά

ABSTRACT

The objective of this study is the development of an optimization model for the design of a route network operated by autonomous buses, aiming to serve passenger demand for multiple metro stations. This problem is a special form of the urban public transport network design problem, which is the Feeder Bus Network Design Problem and is modelled as a capacitated vehicle routing problem. The design concept employed is based on the systems of Autonomous Transport on Demand, which refers to autonomous vehicles transporting passengers to railway stations, as a feeder service. To solve the problem, a Genetic Algorithm was used, producing minimum cost routes in a short amount of time.

Keywords: Feeder-Bus Network, Autonomous Buses, Automated Demand Responsive Transit, Genetic Algorithm, Bus Routes, Transport

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	17
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	17
1.2 ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	19
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	19
2.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΛΕΩΦΟΡΕΙΩΝ	19
2.2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	19
2.2.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	25
2.3 ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	32
2.3.1 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	32
2.4 ΑΝΤΑΠΟΚΡΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΣΤΗ ΖΗΤΗΣΗ	38
2.4.1 ΟΡΙΣΜΟΣ	38
2.4.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	44
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	44
3.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	44
3.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	44
3.2.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	45
3.2.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ	46
3.2.4 ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ.....	47
3.2.5 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ	47
3.3 ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ.....	49
3.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	49
3.3.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	50
3.3.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ	52
3.3.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ	53
3.3.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ.....	55
3.3.6 ΚΥΡΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ/ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	66
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	66

4.2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	66
4.3 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	74
4.3.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΕVOLVER	74
4.3.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	75
4.3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ	76
4.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	77
4.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	78
4.5.1 ΑΡΧΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ (VISUAL BASIC)	78
4.5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ (EVOLVER)	81
4.5.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΛΥΣΗΣ	85
4.6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ	94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	99
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	99
5.2 ΣΥΝΟΨΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	99
5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	100
5.4 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ.....	101
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	103
ΚΩΔΙΚΑΣ	107

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μέρες μας, οι Δημόσιες Αστικές Συγκοινωνίες αποτελούν σημαντικό παράγοντα – πυλώνα στην καθημερινή λειτουργία των αστικών και ημί-αστικών περιοχών, καθώς και στις μεγάλες μητροπολιτικές περιοχές παγκοσμίως. Όμως, δεδομένου ότι τα τελευταία χρόνια η ιδιοκτησία των οχημάτων Ι.Χ. αυξήθηκε σημαντικά, σημειώθηκε αύξηση της κυκλοφορίας στα οδικά δίκτυα των πόλεων έχοντας ως αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου διαδρομής.

Αυτό το γεγονός βέβαια συνεπάγεται στην μη επίτευξη των στόχων της βιώσιμης κινητικότητας των πόλεων, διότι κατά αυτόν τον τρόπο δεν επιτυγχάνεται αποτελεσματική συμβολή των συστημάτων των δημοσίων αστικών συγκοινωνιών. Ο βασικός στόχος των δημοσίων συγκοινωνιών είναι να ελκύουν ολοένα και περισσότερο τους πολίτες έτσι ώστε να μειώνεται η χρήση των οχημάτων Ι.Χ και να αυξάνεται η χρήση των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς.

Τα συστήματα Αστικών Συγκοινωνιών όσον αφορά το ρόλο τους στον αστικό χώρο και την αειφόρο ανάπτυξη διαχωρίζονται σε παραπάνω από μία διαστάσεις στο σύνολο τους, οι οποίες είναι:

- Μία διάσταση είναι ο κοινωνικός χαρακτήρας αυτών, όπου οι Αστικές Συγκοινωνίες εξασφαλίζουν στο σύνολο των κατοίκων μιας πόλης ένα ελάχιστο επίπεδο κινητικότητας και δικαιώματος στις μετακινήσεις, καθώς εξυπηρετούν τους επισκέπτες μιας πόλης και αποτελούν δείγμα της φιλοξενίας που παρέχεται από την πόλη
- Μία άλλη διάσταση είναι ότι αποτελούν τη μοναδική λύση μετακίνησης για ένα σημαντικό τμήμα του πληθυσμού το οποίο δεν έχει την δυνατότητα λόγω διάφορων παραγόντων (π.χ. χαμηλά εισοδήματα) ή δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει οχήματα Ι.Χ. (π.χ. άτομα τρίτης ηλικίας, άτομα με κινητικές δυσκολίες κλπ.)

- Ο ρόλος τους λειτουργεί ως ‘αντίβαρο’ καθώς έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της χρήσης των οχημάτων Ι.Χ. και των δυσμενών επιπτώσεών του στο περιβαλλοντικό και κοινωνικοοικονομικό αστικό περιβάλλον
- Ένα σύστημα Αστικών Συγκοινωνιών θεωρείται λειτουργικό όταν μειώνει σε σημαντικό βαθμό την πρόθεση του μετακινούμενου να χρησιμοποιήσει οχήματα Ι.Χ, αφού μπορεί να προσφέρει οικονομική, γρήγορη και αρκετά άνετη μετακίνηση, χωρίς την ενεργή συμμετοχή του μετακινούμενου
- Μία τελευταία διάσταση είναι η οικονομική βιωσιμότητα των Αστικών Συγκοινωνιών στην οποία συνεισφέρει και εγγυάται το κράτος

Παρ’ όλα αυτά, την τελευταία δεκαετία συναντάται στο πλαίσιο της τεχνολογίας μία καινούργια μορφή τεχνολογίας όσον αφορά τα οχήματα γενικότερα: «**Αυτόνομα Οχήματα**». Η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει εξελιχθεί και έχει αναπτυχθεί ραγδαία την τελευταία δεκαετία, καθώς πρόκειται να συνεισφέρει πολλές θετικές επιπτώσεις στην λειτουργία των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς στο μέλλον. Οι επιπτώσεις αυτές, έχουν να κάνουν με την κινητικότητα, την ασφάλεια, το περιβάλλον και την οικονομία.

Οι επιστήμονες αξιοποιώντας την εμπειρία που έχουν από προηγούμενες τεχνολογικές καινοτομίες (π.χ. ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές), προβλέπουν ότι τα αυτόνομα οχήματα θα είναι αρκετά αξιόπιστα και οικονομικά προσιτά για να αντικαταστήσουν την ανθρώπινη οδήγηση, παρέχοντας με αυτό τον τρόπο κινητικότητα σε αυτούς που δεν οδηγούν. Ένα θετικό στοιχείο είναι ότι με αυτό το τρόπο ευνοούνται για παράδειγμα οι μετακινούμενοι οι οποίοι επιθυμούν να πάνε στη δουλειά τους ή για οποιαδήποτε άλλη απασχόληση.

Άλλες θετικές επιπτώσεις που θα αποφέρει η χρήση των αυτόνομων οχημάτων στο σύστημα μεταφορών είναι:

- Βελτίωση Οδικής Ασφάλειας, Μείωση της Σοβαρότητας των Ατυχημάτων
- Μείωση της Περιβαλλοντικής Ρύπανσης
- Μείωση της Κυκλοφοριακής Συμφόρησης
- Βελτίωση της Άνεσης στη Μετακίνηση
- Καλύτερη Κυκλοφοριακή Ροή
- Μείωση του Κόστους του Οδηγού
- Είναι πιο φιλικά στο χρήστη
- Χρησιμοποιούν ευφυή συστήματα μεταφορών (Intelligence Transport System), τα οποία παρέχουν τα παραπάνω οφέλη

Ωστόσο, υπάρχουν ακόμα κάποια τεχνικά προβλήματα, όπως είναι οι δυσμενείς καιρικές συνθήκες, οι δρόμοι που δεν έχουν ασφαλτωθεί ακόμη καθώς και το όριο της ασύρματης πρόσβασης τα οποία πρέπει να λυθούν προκειμένου τα αυτόνομα οχήματα να μπορέσουν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά σε όλες τις περιστάσεις.

Όπως προαναφέρθηκε, οι δημόσιες συγκοινωνίες αποτελούν σημαντικό μέρος των αστικών μεταφορών και παρόλο που η αυτοματοποίηση στις συγκοινωνίες αυτές έχει προχωρήσει με την πάροδο των χρόνων, οι αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν ως στόχο στο άμεσο μέλλον να παράγουν αυτόνομα οχήματα (αυτοκίνητα, λεωφορεία), έτσι ώστε να είναι διαθέσιμα στην αγορά. Αυτό φαίνεται βέβαια και από το γεγονός ότι οι περισσότερες χώρες στον κόσμο με τις πολιτικές που χρησιμοποιούν στο σύστημα συγκοινωνιών τους προωθούν τον τομέα της αυτοματοποίησης.

Σε αντίθεση με την ιδιωτική μεταφορά (Ι.Χ, δίκυκλο), στις δημόσιες συγκοινωνίες έχουν χρησιμοποιηθεί αυτόνομα οχήματα (αυτοκίνητα, λεωφορεία) στο πέρασμα των χρόνων, και συγκεκριμένα στις σιδηροδρομικές συγκοινωνίες, όπως είναι για παράδειγμα το μετρό της Κοπεγχάγης το οποίο λειτουργεί πλήρως αυτόνομα. Παρ' όλα αυτά έχουν γίνει λίγες μελέτες σχετικά με την αποδοχή ενός συστήματος με αυτόνομα οχήματα, καθώς υπάρχουν μελέτες που δείχνουν την αποδοχή των ήδη πλήρως αυτόνομων οχημάτων που λειτουργούν σε κάποια συστήματα, από το χρήστη και το πόσο επιλέγουν οι χρήστες να χρησιμοποιήσουν τέτοιου είδους συστήματα.

Για αυτό το λόγο, η διπλωματική αυτή εργασία θα επικεντρωθεί στο σχεδιασμό ενός δικτύου με τροφοδοτικά αυτόνομα λεωφορεία τα οποία θα καταλήγουν σε σταθμούς μετρό μέσω διαδρομών, οι οποίες θα ελαχιστοποιούν το συνολικό κόστος μεταφοράς. Επίσης, θα σχολιαστούν τα πλεονεκτήματα και τα οφέλη ενός δικτύου που χρησιμοποιεί αυτόνομα λεωφορεία για να καλύψει πλήρως τη ζήτηση, καθώς και ο ρόλος των δικτύων αυτών στον τομέα των Συγκοινωνιών γενικότερα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μία σύντομη αναφορά στο αντικείμενο και το στόχο της διπλωματικής εργασίας και στις διαφορές που παρουσιάζει με άλλες έρευνες επί του θέματος, καθώς επίσης θα γίνει μία σύντομη αναφορά στο περιεχόμενο των κεφαλαίων από τα οποία αποτελείται η παρούσα διπλωματική εργασία.

1.2 ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός δικτύου με τροφοδοτικά αυτόνομα λεωφορεία, τα οποία θα εξυπηρετούν τη ζήτηση που συναντάται στην περιοχή μελέτης και θα καταλήγουν σε σταθμούς μετρό. Πιο συγκεκριμένα, ο στόχος είναι να βρεθούν οι διαδρομές εκείνες που θα συνδέσουν τα λεωφορεία με τους σταθμούς έτσι ώστε να έχουμε το ελάχιστο δυνατό κόστος μεταφοράς. Για να επιτευχθεί όμως αυτό ο σχεδιασμός προϋποθέτει να ικανοποιείται όλη η ζήτηση έχοντας τις ελάχιστες διαδρομές.

Το συγκεκριμένο πρόβλημα στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται με τον όρο «**Feeder Bus Network Design Problem**» και αποτελεί εξειδικευμένο πρόβλημα του ευρύτερου προβλήματος του σχεδιασμού των αστικών συγκοινωνιών όπου στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται με τον όρο «**Transit Route Network Design Problem**». Η διαφορά όμως από άλλες προηγούμενες διπλωματικές που έχουν γίνει επί του θέματος είναι ως προς την τεχνολογία του οχήματος, δηλαδή τα λεωφορεία σε αυτή την περίπτωση θα είναι αυτόνομα. Ουσιαστικά ο στόχος της εργασίας είναι ο σχεδιασμός δικτύου μεταφορών με μικρά αυτόνομα λεωφορεία (modular vehicles) που θα καταλήγουν σε σταθμούς μετρό. Αυτό βέβαια συνεπάγεται στο ότι τα λεωφορεία αυτά έχουν μικρότερη χωρητικότητα από τα συμβατικά λεωφορεία γεγονός που οδηγεί στην ύπαρξη πολλών διαδρομών για να ικανοποιηθεί η ζήτηση. Εδώ έγκειται η διαφορά με μοντέλα συμβατικών λεωφορείων άλλων ερευνών που έχουν γίνει επί του θέματος. Στη περίπτωση που υπάρχει ανικανοποίητη ζήτηση αντί να υπάρχουν επιπρόσθετες

διαδρομές που θα ικανοποιούν τη ζήτηση αυτή, θα προστίθενται στις βασικές διαδρομές αυτόνομα λεωφορεία τα οποία θα πηγαίνουν στις στάσεις που υπάρχει ανικανοποίητη ζήτηση και αφού μαζέψουν τους επιβάτες και ικανοποιηθούν οι χωρητικότητες των λεωφορείων αυτών, τότε θα καταλήγουν στους σταθμούς μετρό. Για αυτό το λόγο η εργασία αυτή διαφέρει από τις υπόλοιπες εργασίες που έχουν γίνει για το σχεδιασμό ενός δικτύου με τροφοδοτικές γραμμές.

Δύο ακόμα σημαντικές διαφορές από άλλες εργασίες είναι ότι πρώτον, το πρότυπο ζήτησης που θα χρησιμοποιηθεί στην εργασία είναι το πρότυπο Many-to-Many, δηλαδή η ζήτηση θα είναι από πολλαπλές προελεύσεις σε πολλαπλούς προορισμούς σε αντίθεση με τις περισσότερες εργασίες που ακολουθούν πρότυπο Many-to-One, δηλαδή πολλαπλές προελεύσεις και ένας προορισμός και δεύτερον ότι η ζήτηση προς τους σταθμούς μετρό δεν είναι προκαθορισμένη σε αυτή την περίπτωση, όπως συναντάται σε πολλές άλλες μελέτες, αλλά προσαρμόζεται με βάση το προγραμματιστικό μοντέλο που υλοποιήθηκε για την εργασία αυτή, ανάλογα με τυχόν αυξομειώσεις που μπορεί να παρουσιαστούν.

Τα υπόλοιπα κεφάλαια της διπλωματικής εργασίας δομούνται ως εξής: Στο **Κεφάλαιο 2** θα γίνει μία εκτενής ανασκόπηση στις ενότητες από τις οποίες αποτελείται η εργασία, δηλαδή θα γίνει αναφορά σε άλλες έρευνες και μελέτες που έχουν γίνει σχετικά με το αντικείμενο της διπλωματικής και θα γίνει μία περιγραφή για τις υπηρεσίες DRT που αποτελούν και τη μεθοδολογία που θα χρησιμοποιηθεί. Στο **Κεφάλαιο 3**, θα παρουσιαστεί το μαθηματικό μοντέλο, που θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του προβλήματος και θα παρουσιαστεί ο Γενετικός Αλγόριθμος που θα εφαρμοστεί για τη βελτιστοποίηση αφού γίνει πρώτα μία αναφορά στους αλγόριθμους αυτούς. Στο **Κεφάλαιο 4** θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του αλγορίθμου και θα επιλεγεί η βέλτιστη λύση, καθώς θα πραγματοποιηθεί ανάλυση ευαισθησίας ως προς τις παραμέτρους της βέλτιστης λύσης. Επίσης θα αναφερθούν τα δεδομένα της περιοχής μελέτης στην οποία θα εφαρμοστεί ο αλγόριθμος. Τέλος στο **Κεφάλαιο 5** θα σχολιαστούν τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν και θα αναφερθούν προτάσεις για μελλοντική έρευνα επί του θέματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μία εκτενής αναφορά στις ενότητες από τις οποίες αποτελείται η εργασία. Πιο αναλυτικά, θα δοθούν οι ορισμοί για το σχεδιασμό των τροφοδοτικών γραμμών λεωφορείων αλλά και του δικτύου γενικότερα, για τα αυτόνομα οχήματα και για τις υπηρεσίες «Ανταποκρινόμενες Μεταφορές στη Ζήτηση» ή αλλιώς Demand Responsive Transit που αποτελεί και τη μεθοδολογία επίλυσης του προβλήματος. Για κάθε μία από αυτές τις ενότητες θα γίνει μία εκτενής ανασκόπηση στις έρευνες που έχουν γίνει σε βάθος χρόνου από διάφορους μελετητές και στα συμπεράσματα αυτών.

2.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΛΕΩΦΟΡΕΙΩΝ

2.2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Το πρόβλημα αυτό αποτελεί το πρώτο και το σημαντικότερο βήμα στη διαδικασία προγραμματισμού της μεταφοράς των λεωφορείων. Πιο συγκεκριμένα, η σχεδίαση του δικτύου αποτελείται από ένα σύνολο στάσεων λεωφορείου στην υπό μελέτη περιοχή στην οποία λαμβάνεται υπόψη και η ζήτηση από κάθε στάση, η τοπολογία της περιοχής αλλά και διάφοροι άλλοι περιορισμοί, καθώς και την αντικειμενική συνάρτηση.

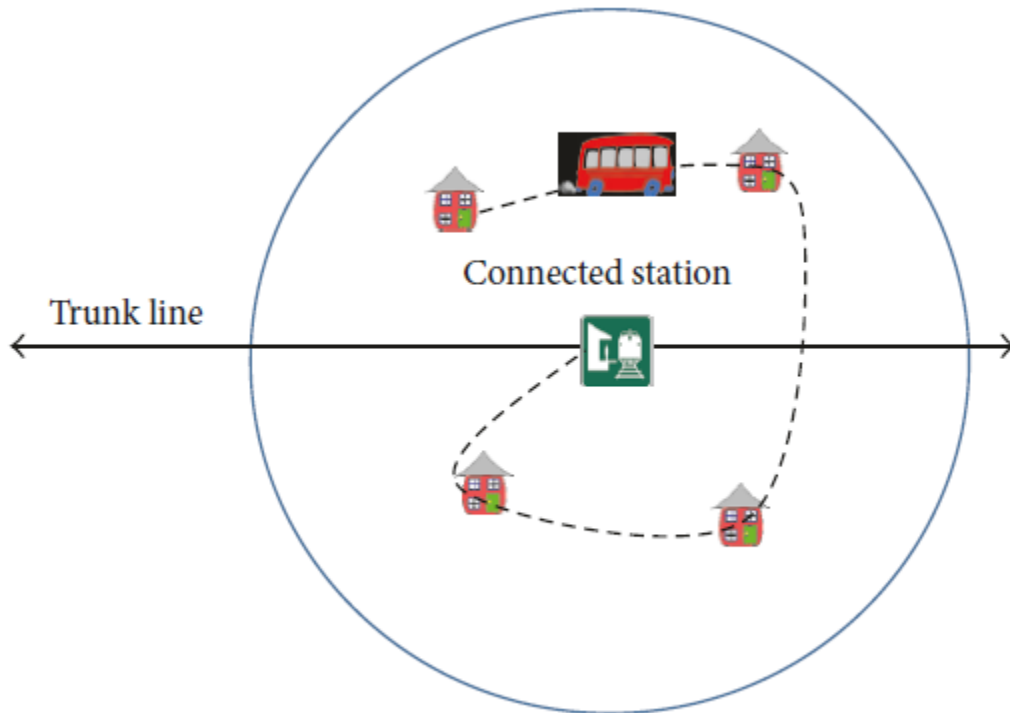
Ο βασικός σκοπός του προβλήματος είναι ο σχεδιασμός της κάθε διαδρομής λεωφορείου στο δίκτυο, για αυτό το λόγο θα πρέπει να ληφθούν οι σωστές και οι κατάλληλες αποφάσεις, για το ποιες μεταβλητές θα θεωρηθούν ως μεταβλητές σχεδιασμού του προβλήματος, και ποιοι περιορισμοί θα τεθούν ανάλογα με τις μεταβλητές αυτές.

Ουσιαστικά το γενικό πρόβλημα διατυπώνεται ως εξής:

«Οι επιβάτες θα συγκεντρώνονται σε στάσεις λεωφορείων που βρίσκονται στην περιοχή εξυπηρέτησης, κοντά στον τόπο κατοικίας τους, όπου μέσω αυτών των στάσεων θα έχουν πρόσβαση στον προορισμό τους. Οι επιβάτες θα ταξιδεύουν με τροφοδοτικά λεωφορεία

σε όλους τους σιδηροδρομικούς σταθμούς του δικτύου και από εκεί θα κατευθύνονται προς το κέντρο της πόλης ή τον προορισμό τους, με βασικό στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους».

Μία εικονική αναπαράσταση του προβλήματος παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 1: Σχηματική Αναπαράσταση του Προβλήματος Feeder Bus Network Design (Πηγή: An Agent-Based Model for Dispatching Real-Time Demand-Responsive Feeder Bus - Xin Li, Ming Wei, Jia Hu, Yun Yuan and Huifu Jiang, 2018)

Η οριζόντια μαύρη γραμμή υποδηλώνει τον άξονα της σιδηροδρομικής γραμμής, η διακεκομμένη γραμμή δηλώνει την διαδρομή που θα ακολουθήσει το λεωφορείο και με τον κύκλο νοείται η περιοχή εξυπηρέτησης.

Η διαδικασία αυτή συμβαίνει σχεδόν σε όλο το τον κόσμο καθημερινώς και η επίτευξη αυτής επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες και διάφορα άλλα γεγονότα (π.χ. απεργία μέσω μαζικής μεταφοράς).

Απαραίτητη βέβαια προϋπόθεση είναι και η συλλογή δεδομένων. Όπως προαναφέρθηκε, τα δεδομένα αυτά έχουν να κάνουν κυρίως με την τοπολογία της

περιοχής (κυρίως οδικό δίκτυο και στάσεις λεωφορείων), τους πίνακες προέλευσης προορισμού [Π-Π] (οι χρόνοι μεταφοράς, η απόσταση μεταξύ των σιδηροδρομικών σταθμών μετρό και η ζήτηση για κάθε στάση λεωφορείου), το μέγεθος του στόλου καθώς και με σχετικές πληροφορίες για τα κόστη λειτουργίας των αυτόνομων λεωφορείων και των τρένων, το μήκος της διαδρομής, τη ταχύτητα των λεωφορείων και τη ζήτηση.

Όσον αφορά τα οχήματα κατά την ευρύτερη έννοια, υπάρχουν διαφορετικής τεχνολογίας λεωφορεία (συμβατικά ή αυτόνομα) καθένα από τα οποία έχουν διαφορετικές χωρητικότητες. Συνεπώς χρησιμοποιείται ο όρος 'στόλος λεωφορείων' για να περιγράψει το μέγεθος των οχημάτων αυτών. Αναφέρεται ότι το μέγεθος του στόλου των οχημάτων και οι χωρητικότητες αυτών είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες για να καθοριστούν οι συχνότητες των λεωφορείων.

Ανάλογα με το πρόβλημα βέβαια καθορίζονται η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί αντίστοιχα.

➤ Αντικειμενική Συνάρτηση

Το υπό μελέτη πρόβλημα (FBNDP) έχει ως στόχο την βέλτιστη ισορροπία ανάμεσα α) στο κόστος του χρήστη και β) στο κόστος του φορέα, τα οποία αθροιστικά δίνουν το συνολικό κόστος, όπως αναφέρθηκε παραπάνω και τα οποία μπορούν να εκτιμηθούν χρησιμοποιώντας διάφορες παραμέτρους από διάφορα μοντέλα.

➤ Το κόστος του χρήστη περιλαμβάνει:

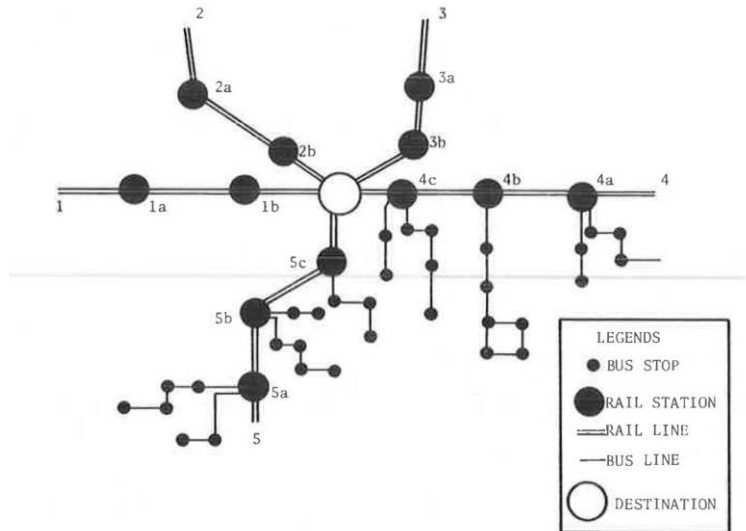
- Τον χρόνο πρόσβασης, δηλαδή ο χρόνος που ένας επιβάτης χρειάζεται για να μεταφερθεί από την αφετηρία στον σταθμό προορισμού (σταθμό μετρό).
- Το χρόνο μεταφοράς, δηλαδή ο χρόνος που χρειάζεται ο επιβάτης για να μεταφερθεί από την μία στάση στην επόμενη κ.ο.κ.
- Το χρόνο αναμονής, δηλαδή ο χρόνος που περιμένει ο επιβάτης το λεωφορείο στην στάση.

- Τον αντιληπτό χρόνο επί του λεωφορείου, δηλαδή ο χρόνος που ο επιβάτης βρίσκεται μέσα στο λεωφορείο ο οποίος σχετίζεται και με τη συχνότητα του λεωφορείου, δηλαδή όσα πιο μεγάλη η συχνότητα του λεωφορείου τόσο μεγαλύτερος είναι και ο αντιληπτός χρόνος επί του οχήματος.
 - Τον χρόνο, ο οποίος προστίθεται στο συνολικό χρόνο ταξιδιού, όπου ο επιβάτης αρνείται να επιβιβαστεί στο λεωφορείο στη στάση στην οποία αυτό βρίσκεται. Αυτή η επιπλέον αναμονή θεωρείται ως ‘απογοητευτικός χρόνος’ για τους επιβάτες και αντιπροσωπεύεται με υψηλότερο κόστος.
- Το κόστος του φορέα περιλαμβάνει:
- Το κόστος λειτουργίας, δηλαδή πόσο κοστίζει η λειτουργία ενός οχήματος ανά ώρα. Στο κόστος αυτό περιλαμβάνονται τα έξοδα συντήρησης και τα έξοδα του φορέα για τους διαχειριστές των λεωφορείων και του οδηγού του λεωφορείου. Πρέπει να σημειωθεί ότι το λειτουργικό κόστος για τα αυτόνομα λεωφορεία είναι χαμηλότερο έναντι των συμβατικών, λόγω των χαμηλότερων απαιτήσεων της εργασίας.
 - Το κόστος κεφαλαίου, δηλαδή το πόσο κοστίζει το κάθε λεωφορείο ξεχωριστά, ανάλογα βέβαια με την τεχνολογία και την χωρητικότητα του λεωφορείου. Τα αυτόνομα λεωφορεία έχουν υψηλότερο κόστος σε σχέση με τα συμβατικά λόγω της τεχνολογίας που χρησιμοποιούν.

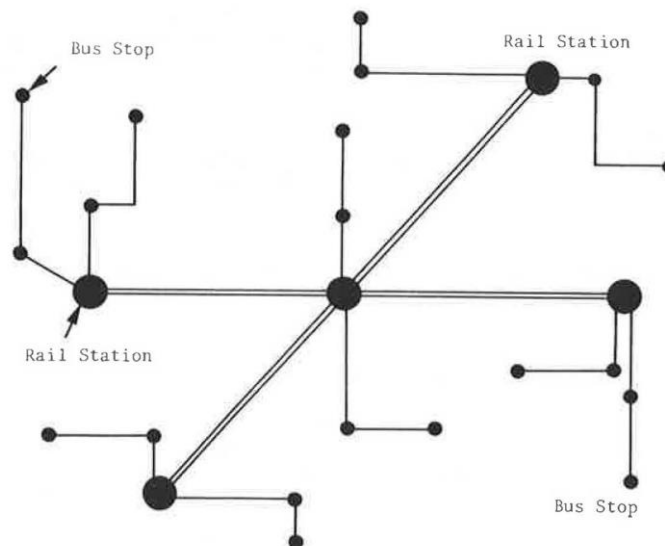
➤ **Πρότυπα Ζήτησης**

Αξίζει να αναφερθεί ότι το πρόβλημα διαχωρίζεται σε δύο πρότυπα ζήτησης: Many-to-One (Πολλά σε Ένα) και Many-to-Many (Πολλά σε Πολλά). Στην πρώτη περίπτωση έχουμε πολλές διαδρομές λεωφορείων που θα καταλήγουν σε ένα σταθμό μετρό και στη

δεύτερη περίπτωση έχουμε πολλές διαδρομές λεωφορείων που θα καταλήγουν σε πολλούς σταθμούς μετρό. Οι περιπτώσεις αυτές απεικονίζονται παρακάτω:



Εικόνα 2: Δίκτυο Τροφοδοτικών Λεωφορείων σε Σταθμό Μετρό, περίπτωση ζήτησης Many-to-One (Πηγή: A Methodology for Feeder-Bus Network Design - Geok Koon Kuah and Jossef Perl, 1989)



Εικόνα 3: Δίκτυο Τροφοδοτικών Λεωφορείων σε Σταθμό Μετρό, περίπτωση ζήτησης Many-to-Many (Πηγή: A Methodology for Feeder-Bus Network Design - Geok Koon Kuah and Jossef Perl, 1989)

I. Πρότυπο Ζήτησης Many-to-One

Το βέλτιστο μοντέλο που θα αναπτυχθεί για το συγκεκριμένο πρότυπο ζήτησης Many-to-One, θα πρέπει να τηρεί τις παρακάτω παραδοχές (Kuah and Perl, 1989):

1. Κάθε στάση λεωφορείου θα εξυπηρετείται μόνο από μία διαδρομή λεωφορείου
2. Κάθε διαδρομή λεωφορείου θα καταλήγει σε μόνο έναν σιδηροδρομικό σταθμό
3. Τα λεωφορεία έχουν συγκεκριμένες και χωρητικότητες και λειτουργικές ταχύτητες

Όσον αφορά την πρώτη παραδοχή, εάν οι επιβάτες έχουν τον ίδιο προορισμό τότε δεν χρειάζεται να έχουμε πολλαπλές διαδρομές οι οποίες θα εξυπηρετούν την ίδια στάση, επομένως σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση θα χρησιμοποιούνται παραπάνω διαδρομές. Η δεύτερη παραδοχή αναφέρεται στο γεγονός ότι τα λεωφορεία δεν πραγματοποιούν τις ίδιες διαδρομές με τις σιδηροδρομικές γραμμές παρά μόνο ότι καταλήγουν στους σταθμούς. Η τρίτη παραδοχή αναφέρεται στο γεγονός ότι τα οχήματα είναι ίδιου τύπου και με τα ίδια χαρακτηριστικά.

II. Πρότυπο Ζήτησης Many-to-Many

Το βέλτιστο μοντέλο που αναπτύχθηκε για το πρότυπο ζήτησης Many-to-One, μπορεί να γενικευθεί και να χρησιμοποιηθεί για το πρότυπο ζήτησης Many-to-Many (Kuah and Perl, 1989), καθώς όπως προαναφέρθηκε σε αυτή την περίπτωση ως προορισμός θεωρείται οποιοσδήποτε σιδηροδρομικός σταθμός του δικτύου. Η σημαντική διαφορά του προτύπου αυτού από το προηγούμενο πρότυπο, είναι ότι κάθε διαδρομή μεταφέρει επιβάτες σε παραπάνω από έναν σιδηροδρομικούς σταθμούς. Αυτό αυτομάτως κάνει πιο δύσκολο το πρόβλημα από το πρότυπο Many-to-One. Σε αυτή την περίπτωση οι στάσεις λεωφορείου μπορεί να εξυπηρετούνται από παραπάνω από μία διαδρομές, καθώς η ζήτηση δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να ξεπερνάει τη χωρητικότητα.

2.2.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Γενικά επί του προβλήματος (FBNDP) έχουν γίνει πάρα πολλές έρευνες και έχουν αναπτυχθεί αντίστοιχα πάρα πολλά μοντέλα και λύσεις. Οι λύσεις αυτές διαχωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες (Xin Li, Ming Wei, Jia Hu, Yun Yuan and Huifu Jiang, 2018):

1. Λύσεις χρησιμοποιώντας μαθηματικά μοντέλα, τα οποία συνήθως έχουν εφαρμογή και είναι αποτελεσματικά σε μικρής έκτασης δίκτυα. Για μεγαλύτερης έκτασης δίκτυα χρησιμοποιούνται γενετικοί αλγόριθμοι οι οποίοι έχουν προσαρμοστεί έτσι ώστε να δίνουν καλύτερη αποτελεσματικότητα.
2. Λύσεις χρησιμοποιώντας ευρετικές μεθόδους οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως για να λύσουν NP-hard προβλήματα και να βρουν την προσεγγιστικά βέλτιστη λύση.
3. Λύσεις χρησιμοποιώντας μετά-ευρετικές μεθόδους, οι οποίες μέθοδοι δίνουν πιο γρήγορα αποτελέσματα και αναπτύχθηκαν κυρίως για να λύσουν πιο πολύπλοκους υπολογιστικά αλγόριθμους όπως είναι ο αλγόριθμος για την βελτιστοποίηση 'αποικιών των μυρμηγκιών' (Ant Colony Optimization), η 'προσομοίωση απόπτωσης' (Simulated Annealing), η 'αναζήτηση tabu' (Tabu Search) και οι γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic Algorithms).
4. Λύσεις χρησιμοποιώντας υβριδικές μεθόδους, οι οποίες αξιοποιούν τις δυνατότητες διαφορετικών υπολογιστικών τεχνικών για να λύσουν το σύνθετο πρόβλημα.

Επίσης αξίζει να αναφερθεί πως ανάλογα με την έρευνα, διαφέρουν και οι μεταβλητές σχεδιασμού που λαμβάνονται υπόψη, καθώς στις περισσότερες μελέτες που έχουν γίνει λαμβάνονται ως μεταβλητές σχεδιασμού η συχνότητα των λεωφορείων και τα δρομολόγια αυτών.

Παρακάτω θα γίνει μία αναλυτική περιγραφή των ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί για το πρόβλημα «Feeder Bus Network Design Problem (FBNDP) », όπου οι λύσεις αυτών ανάλογα με την έρευνα, εμφανίζονται με μία από τις τέσσερις κατηγορίες που αναφέρθηκαν.

Οι πρώτες αναζητήσεις που πραγματοποιήθηκαν επί του προβλήματος, χρησιμοποιούν αναλυτική προσέγγιση και βρίσκουν την βέλτιστη διαδρομή, τη λειτουργία και το βέλτιστο διάστημα απόστασης (το οποίο βασίζεται σε παραδοχές) ανεξάρτητα από τη γεωμετρία του δρόμου και τη χωρική κατανομή της ζήτησης.

Οι Byrne και Vuchic (1972) ήταν οι πρώτοι που μελέτησαν το πρόβλημα, καθώς προσδιόρισαν τη βέλτιστη θέση και τη διαδρομή των παράλληλων γραμμών λεωφορείων καθώς προσδιόρισαν τη μέθοδο με την οποία καθορίζεται ο κατάλληλος και βέλτιστος αριθμός γραμμών λεωφορείου, στην περίπτωση που οι γραμμές λεωφορείου είναι κάθετες ως προς τις σιδηροδρομικές γραμμές και η ζήτηση κατανέμεται σε περιοχή που έχει σχήμα ορθογωνίου.

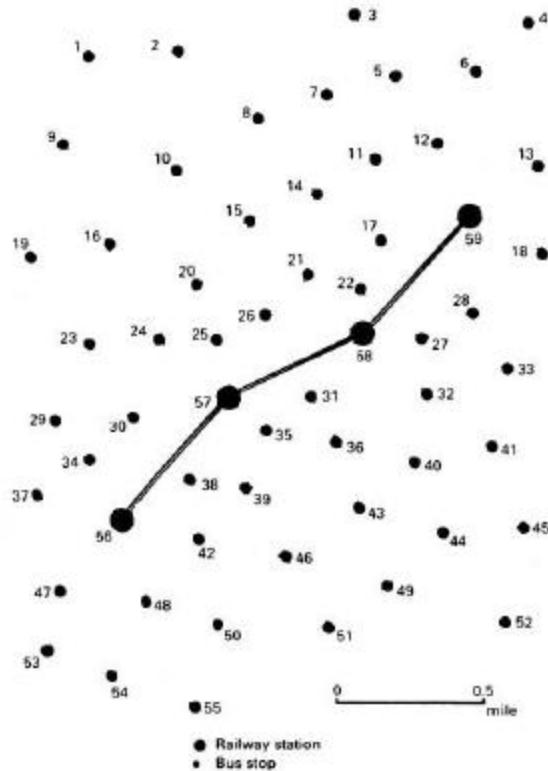
Σύμφωνα με αυτή τη μελέτη, ο Byrne (1976) καθόρισε τα μήκη, τις θέσεις και τις διαδρομές των λεωφορειογραμμών με βάση τα οποία θα ελαχιστοποιούνταν ο χρόνος ταξιδιού του επιβάτη και το λειτουργικό κόστος (του λεωφορείου) και τα οποία θα ανταποκρίνονται σε μια γενική πυκνότητα πληθυσμού και σε διαφορετικές ταχύτητες.

Ένα χρόνο μετά τη μελέτη των Byrne και Vuchic επί του προβλήματος αυτού, ο Hurdle (1973) μελέτησε τον τρόπο με τον οποίο θα πρέπει να τοποθετηθούν οι παράλληλες τροφοδοτικές γραμμές και πως τα δρομολόγια των λεωφορείων θα ανταποκρίνονται στην άφιξη επιβατών, η οποία διαφέρει ως προς την τοποθεσία και τον χρόνο ταξιδιού των επιβατών. Τέσσερα χρόνια μετά, ο Hurdle αλλά και οι Wirasinghe, Newell (1977) πρότειναν διάφορα πρότυπα βελτιστοποίησης για τις βέλτιστες αποστάσεις μεταξύ των σιδηροδρομικών σταθμών, το όριο ζώνης τροφοδοσίας του λεωφορείου και του τρένου συνδυάζοντας κυρίως βασικό λογισμό και συνεχείς διακριτικές προσεγγίσεις.

Ο Wirasinghe (1980) διερεύνησε ένα σύστημα σιδηροδρομικού συστήματος το οποίο θα εξυπηρετεί τη ζήτηση την ώρα αιχμής τύπου M-to-1 (Many to One, δηλαδή πολλές

διαδρομές λεωφορείου που θα καταλήγουν σε έναν σταθμό μετρό), και παρουσίασε ένα προσεγγιστικό αναλυτικό μοντέλο μαζί με τον αντίστοιχο αλγόριθμο λύσης. Το μοντέλο αυτό εφαρμόστηκε στο σύστημα LRT, στο νότιο διάδρομο, της πόλης Κάλγκαρι η οποία είναι η μεγαλύτερη σε πληθυσμό πόλη της Καναδικής επαρχίας Αλμπέρτα.

Ύστερα από 8 χρόνια, το συγκεκριμένο πρόβλημα μελέτησαν οι Kuah και Perl (1988) οι οποίοι βελτιστοποίησαν ταυτόχρονα την απόσταση της κάθε διαδρομής, την πρόοδο της λειτουργίας των λεωφορείων και την απόσταση που θα απέχουν οι στάσεις, καθώς ανέλυσαν τους συντελεστές που επηρεάζουν την διάταξη των στάσεων λεωφορείου σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Ένα χρόνο μετά, οι Kuah και Perl (1989) ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο για το υπό μελέτη πρόβλημα (FBNDP), δηλαδή πρότειναν ένα μοντέλο για το σχεδιασμό δικτύου τροφοδοτικών λεωφορείων έχοντας πρόσβαση στην υπάρχουσα σιδηροδρομική γραμμή βάση του προτύπου ζήτησης Many-to-One καθώς πρότειναν και τον αντίστοιχο ευρετικό αλγόριθμο που βασίστηκε στην εξοικονόμηση χρόνου. Επίσης, κατάφεραν να γενικεύσουν το πρότυπο ζήτησης του προβλήματος από Many-to-Many σε Many-to-One, διαχωρίζοντας τις στάσεις του λεωφορείου σε κόμβους, όπου ο αριθμός των κόμβων αυτών είναι ίδιος με τον αριθμό των σιδηροδρομικών σταθμών και επίσης πραγματοποίησαν ανάλυση ευαισθησίας για το μοντέλο αλλάζοντας το στόχο της αντικειμενικής συνάρτησης, τη μεταβολή της ζήτησης, τη χωρητικότητα των λεωφορείων, τα κόστη εργασίας και καυσίμων καθώς και το σιδηροδρομικό δίκτυο. Παρακάτω απεικονίζεται σχηματικά η διαμόρφωση των σιδηροδρομικών σταθμών και των στάσεων των λεωφορείων (ως κόμβοι) όπου χρησιμοποίησαν οι Kuah and Perl (1989):



Εικόνα 4: Αναπαράσταση της διαμόρφωσης των σιδηροδρομικών σταθμών και των στάσεων λεωφορείου που χρησιμοποίησαν οι Kuah and Perl , 1989 (Πηγή: Validating an Improved Model for Feeder Bus Network Design Using Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO) – Mohammad Hadi Almasi, Sina Mirzapour Mounes and Mohamed Reham Karim, 2015)

Οι Chien και Schonfeld (1998) ήταν οι επόμενοι μετά από 10 χρόνια που μελέτησαν το πρόβλημα, οι οποίοι χώρισαν τον αστικό διάδρομο σε διάφορες ζώνες κυκλοφορίας με διαφορετικό μήκος και ίδιο πλάτος και βελτιστοποίησαν από κοινού το μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής, την απόσταση μεταξύ των σιδηροδρομικών σταθμών, τις διαδρομές των λεωφορείων, την απόσταση μεταξύ των στάσεων λεωφορείου και τις διαδρομές λεωφορείου υπό την προϋπόθεση ότι ο η πυκνότητα των επιβατών σε κάθε ζώνη κυκλοφορίας είναι η ίδια και ότι μόνο μία τροφοδοτική γραμμή λεωφορείου συνδέεται στον ίδιο σιδηροδρομικό σταθμό. Το πρόβλημα που μελέτησαν οι Chien και Schonfeld βασίζεται στην υπόθεση ότι η θέση της σιδηροδρομικής γραμμής που θα μελετηθεί είναι προκαθορισμένη.

Οι Chien και Yang (2000) ανέπτυξαν ένα μοντέλο για την εύρεση της βέλτιστης θέσης διαδρομής λεωφορείου και τη λειτουργία της σε μια ετερογενή περιοχή εξυπηρέτησης λαμβάνοντας υπόψη και τις καθυστερήσεις αυτών. Στο μοντέλο, λήφθηκαν υπόψη οι ακανόνιστες και διακριτές κατανομές ζήτησης τύπου Many-to-One και παρουσίασαν τον σχεδόν βέλτιστο αλγόριθμο. Στην έρευνα αυτή αξίζει να αναφερθεί ότι γίνεται υπόθεση σχετικά με τη ζήτηση, δηλαδή κατανέμεται ομοιόμορφα σε κάθε ζώνη της περιοχής εξυπηρέτησης αλλά διαφέρει μεταξύ των ζωνών.

Στην προσέγγιση των Kuah και Perl βασίστηκαν οι Martins και Pato (1998), οι οποίοι ανέπτυξαν δύο μεθόδους με τις οποίες θα μπορούσε να προσεγγιστεί η αρχική λύση. Αυτές οι μέθοδοι είναι η μέθοδος Διαδοχικής Κατασκευής (Continuous Construction) και η μέθοδος Δύο Φάσεων (Two-Phase Method). Επιπρόσθετα, ανέπτυξαν την ευρετική μέθοδο 'τοπική αναζήτηση' (local search) και την μετά-ευρετική μέθοδο 'αναζήτηση Tabu' (Tabu Search) για να δώσουν λύση στο πρόβλημα αυτό, καθώς οι δύο αυτές μέθοδοι δίνουν αποτελέσματα για πολύ δύσκολα υπολογιστικά προβλήματα βελτιστοποίησης.

Τρία χρόνια μετά το πρόβλημα διερεύνησαν οι Shrivastav και Dhingra (2001) οι οποίοι ανέπτυξαν ένα δίκτυο τροφοδοτικών λεωφορείων, στο οποίο ενσωμάτωσαν τη λειτουργία των προαστιακών σιδηροδρομικών σταθμών και των αστικών λεωφορείων. Βάση αυτού του προβλήματος, ανέπτυξαν έναν ευρετικό αλγόριθμο χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνικές για την επιλογή και την εισαγωγή των κόμβων. Οι Kuan και Ong ήταν οι ερευνητές επί του θέματος που επικεντρώθηκαν στους μετά-ευρετικούς αλγόριθμους του προβλήματος (FBNDP) όπως η 'προσομοίωση απόπτωσης' (Simulated Annealing), η 'αναζήτηση tabu' (2004), ο γενετικός αλγόριθμος για την βελτιστοποίηση 'αποικιών των μυρμηγκιών' (Genetic Algorithm and Ant Colony Optimization, 2006) και παράλληλα ανέλυσαν και σύγκριναν τα βέλτιστα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους αλγορίθμους αυτούς. Σημαντική ήταν και η μελέτη που έκανα οι Shrivastava και O'Mahony (2006), οι οποίοι σύμφωνα με τους γενετικούς αλγορίθμους καθόρισαν τις βέλτιστες διαδρομές των τροφοδοτικών λεωφορείων και των δρομολογίων αυτών σε μία προαστιακή περιοχή, παρ' όλα αυτά η μελέτη τους δεν ανταποκρίθηκε στα δεδομένα της

ζήτησης επειδή κατά τη διάρκεια της μελέτης κάποιοι κόμβοι δεν είχαν καλή συνδεσιμότητα μεταξύ τους.

Αξιόλογη ήταν και η μελέτη των Mohaymany και Gholami (2010), οι οποίοι παρουσίασαν μία προσέγγιση για τη λύση του προβλήματος συμπεριλαμβάνοντας στην αντικειμενική συνάρτηση πέρα από την ελαχιστοποίηση του κόστους του χρήστη και του φορέα και την ελαχιστοποίηση του κοινωνικού κόστους (σχετίζεται με τις επιδράσεις του συστήματος στο θόρυβο και την ατμοσφαιρική ρύπανση και την πιθανότητα ατυχήματος). Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποίησαν τον αλγόριθμο για την βελτιστοποίηση 'αποικιών των μυρμηγκιών' ώστε να σχεδιάσουν τις διαδρομές των λεωφορείων και μέσω της διαδικασίας να επιλέξουν την καλύτερη διαδρομή από αυτές.

Μία ακόμη έρευνα που πραγματοποιήθηκε επί του προβλήματος ήταν αυτή του Ciaffi (2012), ο οποίος προσπάθησε να επιλύσει το πρόβλημα (Feeder Bus Network Design Problem) σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση, ανέπτυξε και χρησιμοποίησε έναν ευρετικό αλγόριθμο για τη δημιουργία δύο διαφορετικών και συμπληρωματικών δικτύων, ώστε να επιτευχθεί η ισορροπία ανάμεσα στη μεγιστοποίηση της κάλυψης των υπηρεσιών στην περιοχή και την ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου ταξιδιού. Στη δεύτερη φάση, τα σύνολα που δημιουργήθηκαν στην πρώτη φάση χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου και σχεδιάστηκε ένας γενετικός αλγόριθμος ο οποίος βρίσκει ένα βέλτιστο υπό-σύνολο διαδρομών με τις συναφείς συχνότητες. Βασιζόμενοι στο έργο αυτό, κατασκεύασαν ένα μοντέλο για την διάταξη των τροφοδοτικών λεωφορείων για την αντίστοιχη περιοχή μελέτης που πραγματοποιήθηκε η έρευνα.

Από τις τελευταίες έρευνες που έχουν γίνει, είναι αυτή του Ma Zhao (2017) και των Cao και Wang (2017). Οι έρευνες των μελετητών αυτών σχετίζονται με ένα νέο είδος των αστικών συγκοινωνιών που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια, το «προσαρμοσμένο λεωφορείο», η λειτουργία του οποίου σχετίζεται με την ανάπτυξη χρονοδιαγράμματος και με τον προγραμματισμό των οχημάτων. Το είδος αυτό ξεκίνησε να εφαρμόζεται στο Πεκίνο. Πιο συγκεκριμένα ο Ma Zhao, έλαβε υπόψη του τον προγραμματισμό στάσεων και τα χρονοδιαγράμματα με στόχο την ελαχιστοποίηση των ενδιαφερόντων των

επιβατών και της κοινωνίας γενικότερα. Οι Cao και Wang έλαβαν υπόψη την κατανομή των επιβατών στα 'προσαρμοσμένα λεωφορεία' και διαπίστωσαν ότι τα οχήματα με μικρότερα φορτία μπορούν να εξυπηρετήσουν τους επιβάτες με μεγαλύτερη ευελιξία, καθώς μπορούν να προσφέρουν ποικίλα άλλα πλεονεκτήματα. Επίσης την ίδια χρονιά, ο Zhou (2017), βασιζόμενος στο πρόβλημα δρομολόγησης των οχημάτων με χρονικά παράθυρα (VRPTW), διεξήγαγε δύο στρατηγικές στις οποίες περιέλαβε πληροφορίες κίνησης των οχημάτων και έδειξε την αποτελεσματικότητα αυτών μέσω κάποιων παραδειγμάτων. Οι μελέτες αυτές, μελετούν το πρόβλημα του 'προσαρμοσμένου λεωφορείου' ως μία γενική εκδοχή του προβλήματος χρονολόγησης των οχημάτων με παραλαβή και παράδοση.

Άλλη μία από τις τελευταίες μελέτες που έχουν γίνει ήταν αυτή των Deng L. B., He Y., Zeng N. X. και Zeng J. H. (2020), οι οποίοι σχεδίασαν ένα δίκτυο με τροφοδοτικές γραμμές, λαμβάνοντας υπόψη τη διαχωρισμένη παράδοση (split delivery). Πιο συγκεκριμένα στο μοντέλο που ανέπτυξαν έλαβαν υπόψη ως περιορισμούς τη δομή του δικτύου και τη συμπεριφορά των επιβατών ως προς την επιλογή των διαδρομών τους. Και σε αυτή την περίπτωση στόχος ήταν η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, που αποτελούταν από το κόστος του χρήστη και το κόστος του φορέα και για την επίλυση του μοντέλου χρησιμοποίησαν έναν γενετικό αλγόριθμο, ο οποίος αποδείχθηκε αποτελεσματικός για το σχεδιασμό δικτύου με διαχωρισμένη παράδοση.

2.3 ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

Με τον όρο «αυτόνομο όχημα» εννοείται ένα όχημα (αυτοκίνητο, λεωφορείο) το οποίο μπορεί να οδηγηθεί χωρίς την παρέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα, καθώς μέσω ευφυών συστημάτων μεταφορών (Intelligent Transportation Systems) που χρησιμοποιεί μπορεί να αναγνωρίσει το περιβάλλον στο οποίο κινείται, να αναγνωρίσει τυχόν εμπόδια ή άλλα αντικείμενα που συναντά και να επιλέξει τη διαδρομή που θα ακολουθήσει τηρώντας πάντα τους κανονισμούς για την κυκλοφορία.

2.3.1 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

- **Αυτόνομα Οχήματα**

Η ιδέα για αυτοματοποιημένα οχήματα συναντάται για πρώτη φορά στις αρχές του 20^{ου} αιώνα και συγκεκριμένα το 1918 από τον Pendleton, ο οποίος ήταν ο πρώτος που οραματίστηκε ουσιαστικά την αυτόνομη τεχνολογία για τα οχήματα γενικότερα και τις επιδράσεις που θα έχει, αλλά ο General Motors το 1939 ήταν ο πρώτος που υλοποίησε αυτή την ιδέα στην πράξη. Οι πρώτες έρευνες επί του θέματος (Research and Development) άρχισαν τη δεκαετία του 1950 και πραγματοποίησαν από κοινού η 'General Motors' και η 'Ραδιοφωνική Εταιρεία του Αμερικάνικου Εργαστηρίου Sarnoff'.

Στην πορεία των χρόνων και συγκεκριμένα από το 1964 μέχρι και το 2003 έχουν πραγματοποιηθεί και άλλες μελέτες επί του θέματος στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, στην Ευρώπη, στην Ιαπωνία, καθώς διάφορα προγράμματα «Έρευνας και Ανάπτυξης» στις χώρες αυτές λειτουργούν σύμφωνα με δικές τους πρωτοβουλίες αλλά και διάφορων κυβερνητικών ινστιτούτων και πανεπιστημίων, για την ανάπτυξη α) διμοιριών αυτόνομων λεωφορείων, β) 'έξυπνων συστημάτων' που θα τοποθετούνται οχήματα και γ) επεξεργασία εικόνας για την αναγνώριση της οδήγησης.

Η έρευνα για αυτόνομα οχήματα συνεχίστηκε, στις ΗΠΑ το 2004 μέσω του Μεγάλου Οργανισμού Defense Advanced Research Projects Agency's (DARPA) Grand Challenges Program που πραγματοποιεί έρευνες για τέτοια ζητήματα, καθώς επίσης διάφοροι

ερευνητές επιχείρησαν μέσω του οργανισμού αυτού να βάλουν αυτόνομα οχήματα στους αστικούς δρόμους για να δουν την αποδοτικότητα και την αποτελεσματικότητα αυτών στις αστικές περιοχές γενικότερα.

Μερικές αξιόλογες αναφορές είναι αυτές των αυτοκινητοβιομηχανιών Volvo και Tesla. Πιο συγκεκριμένα η Volvo άρχισε να μελετάει την αυτόνομη τεχνολογία το 2006 και παρουσίασε το πρώτο πλήρες αυτόνομο όχημα - μόνο για δοκιμή - το 2017, καθώς έχει σχέδια να φέρει στην αγορά το πρώτο πλήρες αυτόνομο όχημα το 2021. Η Tesla ανακοίνωσε το 2014 ότι τα δικά της αυτοκίνητα θα έχουν τη δυνατότητα να οδηγούνται κατά 90% αυτόματα, χωρίς δηλαδή την παρέμβαση του οδηγού. Από το 2014 μέχρι και σήμερα τα αυτοκίνητα της αυτοκινητοβιομηχανίας έχουν τη δυνατότητα 'αυτόματης οδήγησης'.

- **Αυτόνομα Λεωφορεία**

Αξίζει να αναφερθεί ότι έχουν γίνει πολλές μελέτες για την επίδραση των αυτόνομων λεωφορείων στους δρόμους μεγάλων αστικών περιοχών καθώς οι περισσότερες μελέτες επικεντρώνονται στην αντικατάσταση των συμβατικών λεωφορείων με τα αυτόνομα. Ωστόσο υπάρχουν και κάποιες μελέτες στις οποίες μελετάται η κοινή χρήση τόσο των αυτόνομων και των συμβατικών λεωφορείων μαζί στο δίκτυο όσο και οι επιδράσεις αυτών στο σύστημα των συγκοινωνιών. Σε οποιαδήποτε περίπτωση η πληρότητα των οχημάτων παίζει πολύ μεγάλο ρόλο καθώς πρέπει να έχουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη πληρότητα έτσι ώστε στο μέλλον να είναι εφικτή η εξυπηρέτηση της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης.

Ο Bloomberg (2017) συγκεκριμένα σε μια απογραφή που έκανε ο ίδιος έδειξε ότι οι πόλεις σε όλο τον κόσμο ετοιμάζονται για τη μετάβαση σε έναν κόσμο που τα οχήματα θα είναι αυτόνομα. Με βάση αυτή τη μελέτη, 36 πόλεις σε όλο τον κόσμο φιλοξένησαν δοκιμές με αυτόνομα οχήματα με σκοπό να ενσωματωθούν τα οχήματα αυτά στους αστικούς δρόμους των πόλεων, καθώς ταυτόχρονα άλλες 18 πόλεις διεξήγαγαν μεγάλης εμβέλειας έρευνες σύμφωνα με τους κανονισμούς και τις νομοθεσίες της κάθε μίας,

μελέτησαν το σχεδιασμό του δικτύου με τα αυτόνομα οχήματα και ανέλυσαν διάφορα άλλα κυβερνητικά ζητήματα που συνδέονται με αυτά, αλλά παρ' όλα αυτά δεν είχαν πραγματοποιήσει καμία δοκιμή για την λειτουργία αυτών. Σε αυτές τις πόλεις γινόντουσαν επίσης και πολλές δοκιμές των αυτόνομων οχημάτων σε μεταχειρισμένα αυτοκίνητα αλλά και καινούργια οχήματα, τα οποία είναι μικρά αυτόνομα με τη δυνατότητα να κινούνται στα πεζοδρόμια. Τα μέρη στα οποία γινόντουσαν οι δοκιμές αυτές ήταν κυρίως απομονωμένες περιοχές σε σχέση με την υπόλοιπη πόλη (π.χ. πάρκα τεχνολογίας, πανεπιστημιούπολεις, αστικές περιοχές που πρόκειται να ανανεωθούν, εθνικές οδούς κ.α.). Παρ' όλα ο ίδιος ο Bloomberg δήλωσε ότι παρόλο που οι δοκιμές αυτές πραγματοποιούνται στις πόλεις που αναφέρθηκαν, δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν ακόμα στην πλήρη αυτονομία οδήγησης στις σύνθετες αστικές περιοχές. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι πόλεις στις οποίες γίνονται ή έχουν γίνει ή θα γίνουν οι δοκιμές για τα αυτόνομα οχήματα (1) και οι πόλεις που διεξάγουν έρευνες σύμφωνα με τους κανονισμούς της κάθε μίας, αλλά δεν έχουν αρχίσει τις δοκιμές (2):

Πίνακας 1: Πόλεις που έχουν κάνει δοκιμές για τα αυτόνομα οχήματα (Πηγή: Understanding autonomous vehicles: A systematic literature review on capability, impact, planning and policy – Aslf Falsal, Tan Yigitcanlar, Md Kamruzzaman, Graham Currie, 2019)

Πόλεις που έχουν γίνει ή θα γίνουν δοκιμές (1)		Πόλεις που δεν έχουν γίνει ακόμα δοκιμές (2)
Αδελαΐδα, Αυστραλία	Μελβούρνη, Αυστραλία	Ώκλαντ, Νέα Ζηλανδία
Άμστερνταμ, Ολλανδία	Όσλο, Νορβηγία	Μπουένος Άιρες, Αργεντινή
Όστιν, ΗΠΑ	Παρίσι, Γαλλία	Κέιμπριτζ, Μασαχουσέτη, ΗΠΑ
Βοστώνη, ΗΠΑ	Πίτσμπουργκ, ΗΠΑ	Κολόμπους, ΗΠΑ
Μπρίστολ, Αγγλία	Ρίνο, ΗΠΑ	Ντένβερ, ΗΠΑ
Τσάντλερ, ΗΠΑ	Ρότερνταμ, Ολλανδία	Ντάμπλιν, ΗΠΑ
Τσίμπα, Ιαπωνία	Σαν Αντόνιο, ΗΠΑ	Λος Άντζελες, ΗΠΑ
Ντιτρόιτ, ΗΠΑ	Σαν Φρανσίσκο, ΗΠΑ	Μόντρεαλ, Καναδάς
Ντουμπάι, Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα	Σαν Χοσέ, ΗΠΑ	Νάσβιλ, ΗΠΑ
Έντμοντον, Καναδάς	Σιονγκνάμ, Κορέα	Ορλάντο, ΗΠΑ
Αϊντχόβεν, Ολλανδία	Σιγκαπούρη	Πάλο Άλτο, ΗΠΑ
Γκέτεμποργκ, Σουηδία	Τορόντο, Καναδάς	Πόρτλαντ, ΗΠΑ
Χάαρλεμ, Ολλανδία	Βαγκενίνγκεν, Ολλανδία	Ριονέγρο, Κολομβία

Ελσίνκι, Φιλανδία	Ουάσινγκτον, ΗΠΑ	Σακραμέντο, ΗΠΑ
Λας Βέγκας, ΗΠΑ	Δυτικά Μίντλαντς, Αγγλία	Σάντα Μόνικα, ΗΠΑ
Λονδίνο, Αγγλία	Ουχάν, Κίνα	Σιάτλ, ΗΠΑ
Λιόν, Γαλλία	Γούχου, Κίνα	Σάο Πάολο, Βραζιλία
Μίλτον Κέινς, Αγγλία	Ζούτζου, Κίνα	Τελ Αβίβ, Ισραήλ

Δύο χρόνια μετά με το θέμα ασχολήθηκε ο Zhang (2019), ο οποίος διερεύνησε την επίδραση διάφορων τύπων αυτόνομων λεωφορείων (όπως ημι-αυτόνομα λεωφορεία και πλήρως αυτόνομα) στις ήδη υπάρχουσες γραμμές στο δίκτυο. Στην έρευνα αυτή χρησιμοποίησε ως μεταβλητή απόφασης το μέγεθος του λεωφορείου, όπου θα συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση του γενικευμένου συνολικού κόστους (δηλαδή το κόστος για τον χρόνο αναμονής, το κόστος για το χρόνο μεταφοράς και τα κόστη λειτουργίας και κεφαλαίου), καθώς συμπέρανε ότι τα πλήρως αυτόνομα λεωφορεία έχουν μεγάλες δυνατότητες ώστε να επωφεληθούν του συστήματος. Αναφέρεται ότι η μείωση του λειτουργικού κόστους συνεπάγεται σε μικρότερης χωρητικότητας λεωφορεία και μεγαλύτερους στόλους αυτών με αποτέλεσμα να βελτιώνεται το επίπεδο την υπηρεσίας και να γίνεται πιο φιλικό προς το χρήστη.

Μία άλλη έρευνα επί του θέματος ήταν αυτή του Wen (2018), η οποία δεν επικεντρώθηκε στην ανάλυση των ήδη υπαρχόντων γραμμών και των αντίστοιχων μαθηματικών αλλά στην επίδραση που έχουν τα αυτόνομα λεωφορεία στο σύστημα χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο αλληλεπίδρασης μεταξύ ζήτησης και προσφοράς το οποίο είναι βασισμένο σε προσομοιώσεις και αναλυτικά μοντέλα με δυνατότητες επιλογής τα οποία καθορίζουν τη ζήτηση. Ο Wen περιόρισε την εφαρμογή των αυτόνομων λεωφορείων για τις μετακινήσεις ‘last-mile’ ή αλλιώς τελευταίου χιλιομέτρου. Το μοντέλο αυτό προβλέπει τη ζήτηση προέλευσης και προορισμού εφαρμόζοντας τη λειτουργία των αυτόνομων λεωφορείων στο σύστημα των αστικών συγκοινωνιών, καθώς το μοντέλο είναι βασισμένο στις συνολικές διαδρομές που έχουν πραγματοποιηθεί.

Τη ίδια χρονιά ένας άλλος ερευνητής ο Shen (2018) πρότεινε μια ανάλυση, βασισμένη σε προσομοίωση, συστήματος δημοσίων μεταφορών με αυτόνομα λεωφορεία με σκοπό τον προσδιορισμό των επιπτώσεων της αλλαγής του τρόπου τροφοδοσίας στο συνολικό κόστος χρήστη, καθώς στο προτεινόμενο μοντέλο τα αυτόνομα λεωφορεία χρησιμοποιούνται ως γραμμές τροφοδοσίας τις πρωινές ώρες κατά την ώρα αιχμής.

Οι παραπάνω μελέτες επικεντρώνονται στην κοινή χρήση των αυτόνομων λεωφορείων και των συμβατικών, τις επιδράσεις που έχουν τα αυτόνομα λεωφορεία στο σύστημα των δημοσίων συγκοινωνιών καθώς και στις μετακινήσεις του τελευταίου χιλιομέτρου. Εναλλακτικά, οι Chang και Schonfeld (1991) και ο Chien (2001) ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο για να αναλύσουν τις επιδράσεις της ζήτησης (με αυτόνομα λεωφορεία) που πρέπει να εξυπηρετηθεί σε ήδη υπάρχοντες λεωφορειογραμμές στο σύστημα, υπολογίζοντας το κόστος του χρήστη και το κόστος του φορέα. Οι μελετητές επ' αυτού κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι χρειάζονται μικρότερης χωρητικότητας αυτόνομα λεωφορεία με πιο πολλά δρομολόγια σε σχέση με τις υπηρεσίες των συμβατικών λεωφορείων.

- **Αυτόνομη Τεχνολογία**

Το Υπουργείο Μεταφορών της Αμερικής (US Department of Transportation) κατηγοριοποίησε τα αυτοματοποιημένα οχήματα (αυτοκίνητα, λεωφορεία) σε έξι επίπεδα αυτοματισμού τα οποία είναι βασισμένα στη 'λογική' που χρησιμοποιεί ο Παγκόσμιος Σύλλογος Μηχανικών Αυτοκινήτων (Society of Automotive Engineers, 2016) για τα οχήματα γενικότερα. Τα έξι αυτά επίπεδα απεικονίζονται παρακάτω:



	Level 0	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
Driver's role	Performs all tasks	Controls vehicle	Engages in driving and monitoring the environment	Necessary to take control	May have the option to control	May have the option to control
Automation features	-	Driver assist features	Some automated functions	Some automation functions and monitoring the environment	Vehicle performs all driving functions under certain conditions	Vehicle performs all driving functions under all conditions

Εικόνα 5: Τα έξι επίπεδα αυτοματισμού των οχημάτων (Πηγή: Fully Autonomous Buses: A Literature Review and Future Research Directions - Mojdeh Azad, Nima Hoseinzadeh, Candace Brakewood, Christopher R. Cherry and Lee D. Han, 2019)

Πιο αναλυτικά έχουμε:

1. Επίπεδο 0: Μη Αυτοματοποιημένη Οδήγηση, δηλαδή ο οδηγός πραγματοποιεί όλες τις λειτουργίες (κατεύθυνση, επιτάχυνση, επιβράδυνση) και ελέγχει σε κάθε περίπτωση το όχημα.
2. Επίπεδο 1: Αυτοματοποίηση με τη βοήθεια του οδηγού, δηλαδή ο οδηγός έχει τον πρωταρχικό έλεγχο του οχήματος αλλά υπάρχει και η δυνατότητα κάποιες λειτουργίες να γίνουν αυτόματα οι οποίες βοηθάνε τον οδηγό.
3. Επίπεδο 2: Μερική Αυτοματοποίηση, δηλαδή ο οδηγός συμμετέχει στην οδήγηση και στην παρακολούθηση του ευρύτερου περιβάλλοντος, αλλά κάποιες λειτουργίες πραγματοποιούνται αυτόματα.
4. Επίπεδο 3: Υποχρεωτική Αυτοματοποίηση, όπου οι περισσότερες λειτουργίες γίνονται αυτόματα καθώς το όχημα αναγνωρίζει το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται, αλλά είναι απαραίτητη η συμμετοχή το οδηγού στην περίπτωση που παρουσιαστεί κάποιο πρόβλημα στο όχημα.

5. Επίπεδο 4: Υψηλή Αυτοματοποίηση, όπου το όχημα πραγματοποιεί αυτόματα όλες τις λειτουργίες κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες και υπάρχει η δυνατότητα επιλογής ο οδηγός να ελέγξει το όχημα αν τυχόν χρειαστεί.
6. Επίπεδο 5: Πλήρης Αυτοματοποίηση, όπου το όχημα πραγματοποιεί σε όλες τις περιπτώσεις αυτόματα όλες τις λειτουργίες και μπορεί να αναγνωρίσει το περιβάλλον στο οποίο κινείται καθώς η δυνατότητα επιλογής του οδηγού να συμμετάσχει στην οδήγηση του οχήματος είναι προαιρετική.

2.4 ΑΝΤΑΠΟΚΡΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΣΤΗ ΖΗΤΗΣΗ

2.4.1 ΟΡΙΣΜΟΣ

Η εισαγωγή των αυτόνομων οχημάτων στο σύστημα δημόσιων και ιδιωτικών μεταφορών των πόλεων έχει τη δυνατότητα να αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο εξυπηρετούνται οι υπηρεσίες αυτών διευκολύνοντας την κίνηση των οχημάτων με σκοπό τη μετάβαση σε πιο ευέλικτες και λειτουργικές υπηρεσίες που ανταποκρίνονται άμεσα στη ζήτηση. Τα συμβατικά συστήματα δημόσιων μεταφορών προσφέρουν προγραμματισμένες υπηρεσίες σε άκαμπτα δίκτυα, στα οποία οι επιβάτες πρέπει να προσαρμοστούν με βάση τη διαδρομή έτσι ώστε να φτάσουν στον προορισμό τους.

Οι υπηρεσίες αυτές οι οποίες διευκολύνουν τη μετακίνηση των οχημάτων στις ιδιωτικές, αλλά κατά πολύ περισσότερο στις δημόσιες μεταφορές ονομάζονται ως «Ανταποκρινόμενες Μεταφορές στη Ζήτηση» (Demand Responsive Transit). Στόχος των υπηρεσιών αυτών στο υπό μελέτη πρόβλημα (FBNDP), είναι να μεταφέρει όλους επιβάτες στους σιδηροδρομικούς σταθμούς της περιοχής εξυπηρέτησης στέλνοντας λεωφορεία τα οποία θα καλύπτουν τη ζήτηση που πρέπει να εξυπηρετηθεί. Οι υπηρεσίες αυτές είναι περισσότερο αποτελεσματικές σε κατοικημένες περιοχές μικρής πυκνότητας, λαμβάνοντας υπόψη τις επιθυμίες κάθε επιβάτη οι οποίοι χρησιμοποιώντας μια εφαρμογή κινητού τηλεφώνου, μπορούν να προγραμματίσουν το ταξίδι τους αναφέροντας το πότε θέλουν να αναχωρήσουν, την στάση από την οποία θα

αναχωρήσουν, τη στάση στην οποία θα κατέβουν, τον προορισμό τους καθώς και το προκαθορισμένο δρομολόγιο του σιδηροδρομικού σταθμού μετρό, ανεβάζοντας με αυτό τον τρόπο το επίπεδο της υπηρεσίας. Αυτές οι υπηρεσίες χρησιμοποιούν κυρίως εφαρμογές κινητού ή ιστοσελίδες στο διαδίκτυο για να γίνουν οι κρατήσεις των επιβατών.

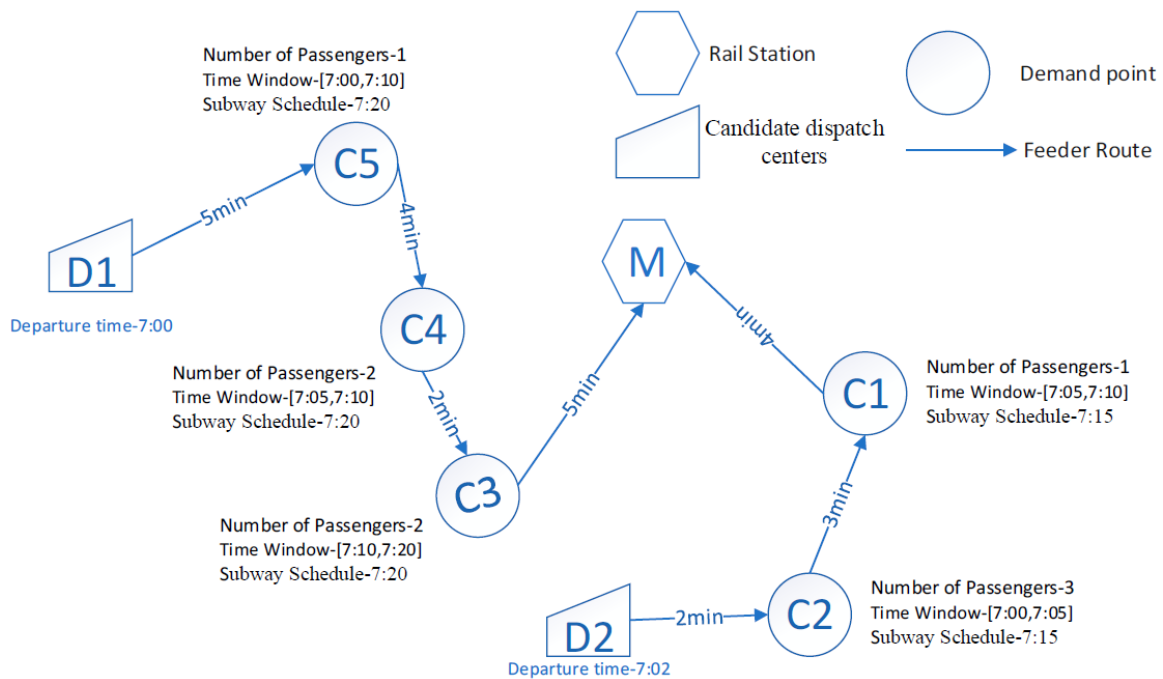
Λόγω και του αντικειμένου της διπλωματικής, σε αυτήν την περίπτωση θα χρησιμοποιηθεί η υπηρεσία «Αυτόματη Ανταποκρινόμενη Μεταφορά στη Ζήτηση» (Automated Demand Responsive Transit). Και σε αυτή την περίπτωση, η υπηρεσία ανταποκρίνεται στις επιθυμίες των επιβατών στέλνοντας έναν στόλο από πλήρως αυτόνομα λεωφορεία. Η διαφορά όμως σε σχέση με τα συμβατικά λεωφορεία είναι ως προς τη χωρητικότητα και στην ευελιξία των υπηρεσιών αυτών καθώς τα αυτόνομα λεωφορεία έχουν μικρότερη χωρητικότητα. Για το λόγο αυτό, η υπηρεσία αυτή μπορεί να αντικαταστήσει την υπηρεσία των συμβατικών λεωφορείων στις περιοχές που υπάρχει χαμηλή έως μέτρια ζήτηση και στις περιοχές όπου λόγω υψηλού κόστους εργασίας απαγορεύονται οι υπηρεσίες DRT. Να σημειωθεί βέβαια, ότι οι υπηρεσίες DRT έχουν αποδειχθεί ότι είναι πολύ ακριβές και συνεπώς μη οικονομικά βιώσιμες και ειδικά όταν πρόκειται για περιπτώσεις χαμηλής ζήτησης, ενώ απαιτούν πολύ υψηλά επίπεδα επιδοτήσεων στις αναπτυγμένες χώρες που έχουν υψηλό κόστος εργασίας. Αναφέρεται ότι για να αξιολογηθεί η λειτουργία της υπηρεσίας «Αυτόματη Ανταποκρινόμενη Μεταφορά στη Ζήτηση» χρησιμοποιείται ένα μοντέλο προσομοίωσης στο οποίο λαμβάνεται υπόψη τόσο το κόστος των επιβατών όσο και το κόστος του φορέα για συγκεκριμένες προδιαγραφές του συστήματος και συγκεκριμένα σενάρια.

Οι υπηρεσίες «Automated Demand Responsive Transit», διαχωρίζονται σε τέσσερις διαστάσεις, οι οποίες είναι:

1. Προσβασιμότητα (Accessibility): Παρέχουν υπηρεσίες 'από στάση σε στάση' ή 'από πόρτα σε πόρτα'.

2. Αμεσότητα (Directness): Σε αυτή την περίπτωση έχουμε δύο ειδών υπηρεσίες, τις υπηρεσίες άμεσης εξυπηρέτησης (όπου δεν πραγματοποιούνται μεταφορές και δεν γίνονται ενδιάμεσες στάσεις) και τις υπηρεσίες δικτύου (όπου πολλές διαδρομές είναι πλήρως ή μερικώς προκαθορισμένες με πολλές στάσεις και μεταφορές).
3. Κοινή Χρήση των Οχημάτων (Vehicle sharing): Όπου τα οχήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν από κοινού είτε στο χώρο όταν οι επιβάτες βρίσκονται στο ίδιο όχημα, είτε στο χρόνο όταν το όχημα χρησιμοποιείται από πολλά άτομα διαδοχικά.
4. Ανταπόκριση στη Ζήτηση (Demand Responsiveness): Όπου μπορεί να καθοριστούν διάφοροι περιορισμοί για την αναμονή των επιβατών αλλά και διαφορετικού βαθμού ανταπόκρισης στη ζήτηση.

Ένα παράδειγμα των υπηρεσιών «Demand Responsive Transit» απεικονίζεται παρακάτω:



Εικόνα 6: Γραφική Αναπαράσταση των υπηρεσιών DRT (Πηγή: Personalised and Coordinated Demand-Responsive Feeder Transit Service Design: A Genetic Algorithms Approach - Bo Sun, Ming Wei, Chunfeng Yang, Zhihuo Xu and Han Wang, 2018)

Στο παραπάνω παράδειγμα έχουμε τις διάφορες διαδρομές που θα κάνουν τα λεωφορεία με τον αντίστοιχο χρόνο, τα οποία θα ξεκινάνε από τα αμαξοστάσια D1 και D2 αντίστοιχα και θα περνάνε από τα σημεία ζήτησης (ή τις στάσεις) C1, C2, C3, C4, C5 όπου θα παραλαμβάνουν τους επιβάτες και θα καταλήγουν στον σιδηροδρομικό σταθμό Μ. Επίσης οι επιβάτες επιλέγουν τα δρομολόγια του προαστιακού σιδηρόδρομου, όπου στο παράδειγμα είναι τα δρομολόγια των 7:15 και 7:20, καθώς έχουν και τη δυνατότητα να επιλέξουν τη στάση και το χρονικό διάστημα στο οποίο επιθυμούν να τους παραλάβει το λεωφορείο. Για παράδειγμα στο σημείο ζήτησης C3 βρίσκονται 2 επιβάτες οι οποίοι επιθυμούν να τους παραλάβει το λεωφορείο στο χρονικό διάστημα [7:10,7:20], επομένως το λεωφορείο πρέπει υποχρεωτικά να βρίσκεται στο σημείο ζήτησης C3 σε αυτό το διάστημα.

2.4.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Οι υπηρεσίες Demand Responsive Transit, ανήκουν στα 'NP-hard' προβλήματα και έχουν χαρακτηριστικά και από το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (Vehicle Routing Problem) και από το πρόβλημα παραλαβής και παράδοσης με χρονικά παράθυρα (Pickup and Delivery Problem with Time Windows), όπου τα οχήματα επισκέπτονται τις περιοχές στις οποίες θα παραλάβουν ή θα αφήσουν τους επιβάτες καθώς όπως προαναφέρθηκε παρέχουν και υπηρεσίες 'από πόρτα σε πόρτα'.

Στο πέρασμα των χρόνων έχουν γίνει αρκετές μελέτες για τις υπηρεσίες DRT, οι οποίες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, α) μελέτες που χρησιμοποίησαν αναλυτική προσέγγιση και β) μελέτες που χρησιμοποίησαν προσέγγιση δικτύου.

α) Αναλυτικές Προσεγγίσεις

Οι αναλυτικές προσεγγίσεις δείχνουν για την περιοχή εξυπηρέτησης τη βέλτιστη σχέση ανάμεσα στην απόσταση της κάθε διαδρομής, την λειτουργία κάθε διαδρομής και τον χώρο των στάσεων, καθώς απαραίτητο είναι και να γνωρίζουμε τη γεωμετρία του δρόμου και τη ζήτηση κάθε στάσης. Παρ' όλα αυτά, οι αναλυτικές προσεγγίσεις δεν χρησιμοποιούνται σε όλες τις περιπτώσεις που έχουμε υπηρεσίες DRT διότι τα δύο

δεδομένα εισόδου του μοντέλου (γεωμετρία του δρόμου και ζήτηση κάθε στάσης) υπόκεινται σε σημαντικούς περιορισμούς.

Η πρώτη μελέτη στην οποία χρησιμοποιήθηκε αναλυτική προσέγγιση ήταν αυτή του Wirasinghe (1980), η οποία πραγματοποιήθηκε στο σύστημα DRT των νοτίων προαστίων της πόλης Κάλγκαρι, η οποία ανήκει στην Καναδική επαρχία της επαρχίας Αλμπέρτας, κατά την ώρα αιχμής της ζήτησης. Πάνω σε αυτή τη μελέτη στηρίχθηκαν οι Kuah and Perl (1988, 1989) οι οποίοι ανέλυσαν την επίδραση των αποστάσεων που απέχουν οι στάσεις των λεωφορείων μεταξύ τους στο μοντέλο του DRT.

Έπειτα τη μελέτη επί του θέματος συνέχισε ο Chowdhury (2002) ο οποίος συμπεριέλαβε στο μοντέλο DRT προκαθορισμένες διαδρομές, καθώς λήφθηκαν υπόψη επίσης οι αφίξεις των τροφοδοτικών λεωφορείων στους σταθμούς μεταφοράς.

Μία πρόσφατη έρευνα ήταν αυτή των Papanikolaou A. και Basbas S. (2020), οι οποίοι παρουσίασαν ένα αναλυτικό μοντέλο στην υπεραστική περιοχή του Λαγκαδά, η οποία βρίσκεται βορειοανατολικά της Θεσσαλονίκης, για να αξιολογήσουν την πιθανή εισαγωγή των υπηρεσιών DRT στην περιοχή αυτή. Κατέληξαν στο συμπέρασμα πως για την συγκεκριμένη περιοχή οι υπηρεσίες αυτές αποτελούν την κυρίαρχη επιλογή για ζήτηση από 40 επιβάτες την ώρα ανά κατεύθυνση μέχρι και 70 επιβάτες την ώρα ανά κατεύθυνση. Επίσης, διαπίστωσαν ότι στην περίπτωση αύξηση της ζήτησης απαιτείται περισσότερος στόλος συμβατικών λεωφορείων.

β) Προσεγγίσεις Δικτύου

Οι μελέτες που χρησιμοποιούν την προσέγγιση δικτύου καθορίζουν τις διαδρομές των λεωφορείων οι οποίες επισκέπτονται τις τοποθεσίες παραλαβής των επιβατών, όπου οι τοποθεσίες αυτές απεικονίζονται ως κόμβοι και οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων αναπαριστούν τα τμήματα των διαδρομών αυτών. Όσον αφορά το μοντέλο DRT, υπάρχουν δύο ειδών προσεγγίσεις δικτύου, i) το μοντέλο βελτιστοποίησης για τον σχεδιασμό δικτύου με τροφοδοτικά λεωφορεία, το οποίο πρότειναν οι Kuah και Perl

(1989) αλλά και η επέκταση του μοντέλου αυτού το οποίο πρότειναν οι Chang και Chang (1997), Martins και Pato (1998), Kuan, Ong και Ng (2006), Mohaymany και Gholami (2010), ii) ο αλγόριθμος για τη δημιουργία ευρετικών τροφοδοτικών διαδρομών, τον οποίο πρότειναν οι Shrivastava και Dhingra (2001) αλλά και η επέκταση του αλγορίθμου που πρότειναν οι Shrivastava και O'Mahony (2006-2009).

Σημαντική ήταν η μελέτη του Chen (2013), ο οποίος ενσωμάτωσε στο πρόβλημα «Feeder Bus Network Design Problem» τις υπηρεσίες DRT και πρότεινε η λειτουργία αυτών να γίνεται σε δύο φάσεις. Την ίδια χρονιά έγινε και άλλη μία μελέτη, από τον Deng ο οποίος πρότεινε ένα μοντέλο βασισμένο στη ζήτηση προτύπου Many-to-Many για τις υπηρεσίες DRT το οποίο ελαχιστοποιούσε το κόστος των επιβατών και του φορέα. Έναν χρόνο μετά, ο Pan (2014) παρουσίασε ένα μοντέλο που αποτελούνταν από δύο μέρη το 'upper level' και το 'lower level', όπου στο upper level σκοπός ήταν να εξυπηρετούνται όλοι οι επιβάτες στο σύστημα και στο lower level σκοπός ήταν να επιτευχθεί το βέλτιστο λειτουργικό κόστος των μεταφορών αυτών.

Μία πρόσφατη μελέτη επί του θέματος ήταν αυτή των Charisis et al. (2018), οι οποίοι σχεδίασαν ένα δίκτυο χρησιμοποιώντας τις υπηρεσίες DRT, με τις οποίες συνδέονταν διάφορες τοποθεσίες της περιοχής μελέτης με τους σταθμούς μετρό που εντοπιζόνταν στην περιοχή μελέτης. Πιο συγκεκριμένα πρότεινε ένα μοντέλο βασισμένο στη ζήτηση Many-to-Many το οποίο ελαχιστοποιούσε το συνολικό κόστος μεταφοράς προς τους σταθμούς. Στην περίπτωση αυτή οι επιβάτες θα εξυπηρετούνταν από προκαθορισμένες τοποθεσίες μέσω τροφοδοτικών λεωφορείων και θα κατέληγαν στον επιθυμητό σταθμό μετρό. Ο στόλος των λεωφορείων στην συγκεκριμένη εργασία ήταν ομογενής, δηλαδή ίδιου τύπου οχήματα, έτσι ώστε να λειτουργούν υπό τους ίδιους λειτουργικούς περιορισμούς. Το μοντέλο αυτό εφαρμόστηκε σε μία κατοικημένη περιοχή της Αθήνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει η αναλυτική περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του υπό μελέτη προβλήματος, δηλαδή θα διατυπωθεί η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, οι μεταβλητές απόφασης και οι αντίστοιχοι περιορισμοί, καθώς επίσης θα γίνει μία γενική και εκτενής αναφορά στους γενετικούς αλγόριθμους. Επίσης θα γίνει μία σύντομη αναφορά στην εφαρμογή του Γενετικού Αλγορίθμου που θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του μοντέλου.

3.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Για την επίλυση του προβλήματος θα χρησιμοποιηθεί ο ακέραιος προγραμματισμός, αφού πρώτα διατυπωθούν η αντικειμενική συνάρτηση, οι μεταβλητές και οι αντίστοιχοι περιορισμοί αλλά και μία σύντομη περιγραφή του προβλήματος.

3.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Το πρόβλημα διατυπώνεται γενικά ως εξής:

«Οι επιβάτες θα συγκεντρώνονται στις στάσεις λεωφορείων που βρίσκονται στην περιοχή εξυπηρέτησης όπου μέσω αυτών των στάσεων θα ταξιδεύουν με τροφοδοτικά αυτόνομα λεωφορεία σε όλους τους σιδηροδρομικούς σταθμούς του δικτύου και από εκεί θα κατευθύνονται προς τον προορισμό τους, με βασικό στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους».

Πιο συγκεκριμένα, η περιοχή εξυπηρέτησης θα αποτελείται από 15 κόμβους (C), οι οποίοι αναπαριστούν τις στάσεις των λεωφορείων και από έναν αριθμό ακμών (E), όπου οι ακμές αντιπροσωπεύονται μονοσήμαντα από το ζεύγος (i,j) και $i \neq j$. Για το κάθε ζεύγος αντιστοιχεί και ένα συγκεκριμένο κόστος C_{ij} το οποίο δείχνει το κόστος της διαδρομής του αυτόνομου λεωφορείου για το ζεύγος αυτό.

3.2.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Η μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος πρόκειται για μία επέκταση του μαθηματικού μοντέλου του προβλήματος που πρότειναν οι Kuah and Perl (1989) και οι Martins and Pato (1998) με την προσθήκη κάποιων περιορισμών για τον ελάχιστο και μέγιστο αριθμό αυτόνομων λεωφορείων που πρέπει να υπάρχουν στα τόξα ij τα οποία θα εξυπηρετούν την ανικανοποίητη ζήτηση. Το μαθηματικό μοντέλο απεικονίζεται παρακάτω:

$$\min \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} \sum_{k \in W} (C_{ijk} X_{ijk}) \cdot D_{ijk} + \sum_{j \in C} \sum_{k \in W} X_{0jk} \quad (1)$$

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

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{I+P} X_{ijk} = P, \quad i = 1, \dots, I \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in H} U_{ijk} = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{p=I+1}^{I+P} d_{ip} * \sum_{j=1}^{I+J} X_{ijk} \leq n \cdot Q_k, \quad k = 1, \dots, K, \forall p \in P \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{p=I+1}^{I+P} X_{ipk} = 1, \quad k = 1, \dots, K, \forall p \in P \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{I+P} X_{ipk} \geq 1, \quad k = 1, \dots, K, \forall p \in P \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=I+1}^{I+P} (a_{ijk} - r_{ijk}) = 0, \quad k = 1, \dots, K, \forall p \in P \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=I+1}^{I+P} y_{ijk} \geq f, \quad k = 1, \dots, K, \forall p \in P \quad (9)$$

$$\text{όπου } y_{ijk} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=I+1}^{I+P} (a_{ijk} - r_{ijk})$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=I+1}^{I+P} y_{ijk} \leq F, \quad k = 1, \dots, K, \forall p \in P \quad (10)$$

- $I \rightarrow$ το σύνολο των κόμβων/στάσεων i, j (το τόξο ij αναφέρεται στις στάσεις i και j)
- $W \rightarrow$ το σύνολο των λεωφορείων k
- $P \rightarrow$ το σύνολο των σταθμών μετρό p
- $Q_k \rightarrow$ η χωρητικότητα του λεωφορείου k
- $U_{ijk} \rightarrow$ η ανικανοποίητη ζήτηση στο τόξο ij για τη διαδρομή του λεωφορείου k
- $C = I \cup P \rightarrow$ το σύνολο C περιέχει τις στάσεις/κόμβους i συνόλου I και τους σταθμούς μετρό p του συνόλου P
- $H \subseteq C \rightarrow$ το υποσύνολο των στάσεων I , συμπεριλαμβανομένου και του συνόλου P ανήκουν στο σύνολο C

3.2.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος απεικονίζεται παρακάτω:

$$\min \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} \sum_{k \in W} (C_{ijk} X_{ijk}) \cdot D_{ijk} + \sum_{j \in C} \sum_{k \in W} X_{0jk}$$

Στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης (1) είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, δηλαδή το κόστος του φορέα και το κόστος του χρήστη, για το δίκτυο, λαμβάνοντας υπόψη την απόσταση μεταξύ των στάσεων, καθώς και η ελαχιστοποίηση

του συνολικού αριθμού διαδρομών (X_{0jk}), δηλαδή να έχουμε όσο το δυνατόν λιγότερες διαδρομές οι οποίες θα ικανοποιούν πλήρως την ζήτηση.

3.2.4 ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ

Οι μεταβλητές απόφασης που λήφθηκαν υπόψη για το μαθηματικό μοντέλο απεικονίζονται παρακάτω:

- a_{ijk} : πόσα αυτόνομα μπαίνουν στο τόξο ij (ανά ώρα)
- r_{ijk} : πόσα αυτόνομα βγαίνουν από το τόξο ij (ανά ώρα)
- X_{ijk} : δυαδική μεταβλητή που παίρνει τιμή 1 αν το τόξο ij βρίσκεται στη διαδρομή του λεωφορείου k , αλλιώς 0
- Y_{ijk} : ο αριθμός των αυτόνομων λεωφορείων στο τόξο ij για τη διαδρομή k (ανά ώρα)
- d_{ip} : πόση είναι η ζήτηση από τη στάση i στον σταθμό p

3.2.5 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Οι περιορισμοί που λήφθηκαν υπόψη για το μοντέλο περιγράφονται παρακάτω:

- i. Ο περιορισμός (2) αναφέρει πως κάθε υποσύνολο του συνόλου των στάσεων πρέπει να συνδέεται με έναν σταθμό μετρό.
- ii. Ο περιορισμός (3) αναφέρει πως κάθε στάση λεωφορείου συνδέεται με όλους τους σταθμούς μετρό μέσω διαφορετικών διαδρομών για τον κάθε ένα.
- iii. Ο περιορισμός (4) εξασφαλίζει πως δεν θα υπάρχει ανικανοποίητη ζήτηση, για αυτό το λόγο η παράμετρος αυτή δεν λήφθηκε υπόψη στην αντικειμενική συνάρτηση.
- iv. Ο περιορισμός (5) αναφέρει πως ο συνολικός αριθμός των επιβατών κάθε αυτόνομου λεωφορείου, στο τόξο ij που βρίσκεται, δεν θα υπερβαίνει τη χωρητικότητα κάθε οχήματος. Το n δείχνει πόσα αυτόνομα θα είναι σε εκείνη τη διαδρομή.
- v. Ο περιορισμός (6) αναφέρει πως κάθε στάση λεωφορείου συνδέεται με έναν μόνο σταθμό μετρό ανά διαδρομή.

- vi. Ο περιορισμός (7) αναφέρει ότι κάθε διαδρομή περιλαμβάνει τουλάχιστον μία στάση λεωφορείου και έναν σταθμό μετρό.
- vii. Ο περιορισμός (8) εξασφαλίζει ότι όλα τα αυτόνομα λεωφορεία που προστέθηκαν στο τόξο ij για τη διαδρομή k πρέπει να εξέλθουν αντίστοιχα.
- viii. Ο περιορισμός (9) αναφέρει πως τα σε κάθε τόξο ij θα πρέπει να υπάρχει ένας ελάχιστος αριθμός αυτόνομων οχημάτων έτσι ώστε να εξυπηρετείται η ζήτηση του αντίστοιχου τόξου για κάθε διαδρομή k . Το f υποδηλώνει τον ελάχιστο αριθμό των αυτόνομων λεωφορείων στο τόξο ij , που προκύπτει από τη συχνότητα των λεωφορείων την ώρα και τον χρόνο αναμονής των επιβατών.
- ix. Ο περιορισμός (10) αναφέρει ότι τα αυτόνομα λεωφορεία στο τόξο ij για τη διαδρομή k δεν θα πρέπει να υπερβαίνουν τον μέγιστο αριθμό των αυτόνομων λεωφορείων που έχει οριστεί για κάθε τόξο έτσι ώστε να αποφεύγεται η συμφόρηση. Το F υποδηλώνει τον μέγιστο αριθμό των αυτόνομων λεωφορείων στο τόξο ij .

3.3 ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

3.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από τις αρχές της δεκαετίας του 1970 παρατηρείται ένα συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη συστημάτων επίλυσης προβλημάτων, βασισμένων στις αρχές της Φυσικής Εξέλιξης (Γεωργόπουλος και Λυκοθανάσης, 1999). Τέτοιου είδους συστήματα, διατηρούν έναν πληθυσμό κωδικοποιημένων πιθανών λύσεων του υπό μελέτη προβλήματος και εφαρμόζουν διάφορες διαδικασίες που προέρχονται από τη βιολογική εξέλιξη.

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms) είναι τέτοιου είδους συστήματα και ανήκουν σε μία κλάση αλγορίθμων αναζήτησης και βελτιστοποίησης που βασίζονται σε αναλογίες με τις φυσικές διαδικασίες της εξέλιξης. Γενικά, στο πέρασμα των χρόνων έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι αναζήτησης και βελτιστοποίησης, οι οποίες παρουσίασαν αξιόλογα και αξιόπιστα αποτελέσματα κατά την εφαρμογή τους στις υπολογιστικές μηχανές. Μερικές από τις μεθόδους αυτές που κυριάρχησαν για πολλά χρόνια είναι οι παρακάτω:

1. Μέθοδοι βασισμένες στο λογισμικό (Calculus-based Methods)
2. Απαριθμητικές ή Τυχαίες Μέθοδοι (Enumerative or Random Methods)
3. Μέθοδοι Επαναληπτικής Αναζήτησης (Iterated Search)
4. Προσομοιωμένη Ανόπτηση (Simulated Annealing)
5. Δυναμικός Προγραμματισμός (Dynamic Programming)
6. Ευρετικές Μέθοδοι (Heuristic Methods)

Το μειονέκτημα των μεθόδων αυτών παρ' όλα αυτά είναι πως δεν ανταποκρίνονται σε μεγάλο αριθμό προβλημάτων, παρόλο που έχουν δώσει λύσεις σε πολλές περιπτώσεις μέχρι σήμερα. Στην περίπτωση αυτή τη λύση μπορούν να δώσουν οι Γενετικοί Αλγόριθμοι, όπου η χρήση αυτών είναι πιο αποτελεσματική και αξιόλογη όταν παρουσιάζονται ολοένα και περισσότερα προβλήματα.

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι μαζί με τον Εξελικτικό Προγραμματισμό (Evolutionary Programming), τις Στρατηγικές Εξέλιξης (Evolution Strategies), τα Συστήματα Ταξινόμησης (Classifier Systems) και το Γενικό Προγραμματισμό (Genetic Programming) αποτελούν μία κατηγορία συστημάτων η οποία είναι ευρέως γνωστή με τον όρο Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms) και επιλύουν τέτοιου είδους προβλήματα (Γεωργόπουλος και Λυκοθανάσης, 1999).

3.3.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η πρώτη εμφάνιση των Γενετικών Αλγορίθμων εντοπίζεται στις αρχές του 1950, όταν επιστήμονες, στο χώρο της βιολογίας, αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν υπολογιστές για να προσομοιώσουν πολύπλοκα βιολογικά συστήματα. Όμως σαν έννοια χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον John Holland, όπου το βιβλίο του με τίτλο «*Adaptation in Natural and Artificial Systems of 1975*» βοήθησε καθοριστικά στη δημιουργία ενός πεδίου έρευνας και εφαρμογής που είναι πολύ πιο ευρύ από αυτό των γενετικών αλγορίθμων. Η συστηματική ανάπτυξη των γενετικών αλγορίθμων στην πάροδο των χρόνων οφείλεται στον Holland και τους συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο του Michigan. Ένας από τους μαθητές του Holland, ο Ken De Jong ήταν ο πρώτος που ανέλυσε λεπτομερώς τις δυνατότητες των γενετικών αλγορίθμων στη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Έκτοτε και άλλοι μαθητές του Holland πραγματοποίησαν μελέτες οι οποίες σχετίζονταν με την εφαρμογή των αλγορίθμων αυτών σε διάφορα ζητήματα, όπως ήταν η μελέτη του μαθητή του Holland, David Goldberg για τη βελτιστοποίηση των αγωγών αερίου. Ωστόσο, για τις εξελίξεις των τελευταίων 25 ετών, πολύς κόσμος χρησιμοποιεί τον όρο «*Εξελικτικοί Υπολογιστές ή Εξελικτικοί Αλγόριθμοι*» για να τις περιγράψει.

Η επιρροή του Holland στην ανάπτυξη των αλγορίθμων αυτών έχει ζωτική σημασία, παρ' όλα αυτά υπήρξαν και άλλοι διάφοροι επιστήμονες όπου με το δικό του υπόβαθρο ο καθένας, ανέπτυξαν παρόμοιες ιδέες. Πιο συγκεκριμένα, τη δεκαετία του 1960 στη Γερμανία, οι Ingo Rechenberg και Hans-Paul Schwefel ανέπτυξαν την ιδέα της Στρατηγικής Εξέλιξης, ενώ οι Bremermann, Fogel και άλλοι επιστήμονες στις Ηνωμένες

Πολιτείες της Αμερικής υλοποίησαν την ιδέα του Εξελικτικού Προγραμματισμού. Το κοινό στοιχείο που χρησιμοποιήθηκε στην ανάπτυξη των ιδεών αυτών ήταν η χρήση της μετάλλαξης και της επιλογής· ωστόσο παρόλο που υπήρχαν κάποια αξιόπιστα αποτελέσματα, ο εξελικτικός υπολογισμός άρχισε να δίνει πιο αξιόλογα αποτελέσματα μετά τη δεκαετία του 1980 λόγω της τεχνολογίας των υπολογιστών που έδιναν περισσότερη υπολογιστική ισχύ.

Ενώ ο Ken De Jong ήταν αυτός που ξεκίνησε το ενδιαφέρον για τη βελτιστοποίηση, προειδοποίησε ότι οι Γενετικοί Αλγόριθμοι μπορεί να μην είναι οι κατάλληλοι για βελτιστοποίηση και αυτό σχετίζεται με το θέμα της προσαρμογής. Παρ' όλα αυτά, η χρήση των Γενετικών Αλγορίθμων για βελτιστοποίηση είναι η πιο δημοφιλής μέθοδος και πολύ συχνά επιτυχημένη σε πραγματικές εφαρμογές, καθώς για αυτούς που ασχολούνται με τις μετα-ευρετικές μεθόδους η εφαρμογή των αλγορίθμων αυτών είναι η πιο χρήσιμη.

Σε αντίθεση με τους προηγούμενους εξελικτικούς αλγόριθμους, οι οποίοι επικεντρώθηκαν στη μετάλλαξη, ο γενετικός αλγόριθμος του Holland είχε ένα επιπλέον χαρακτηριστικό, τον «*ανασυνδυασμό*». Για αυτό το λόγο είναι ενδιαφέρον από αυτή την άποψη, να συγκρίνει κανείς μερικές από τις ιδέες που παρουσιάστηκαν στη δεκαετία του 1960 στον τομέα της επιχειρησιακής έρευνας (operational research). Οι μελετητές που ασχολήθηκαν στον τομέα της επιχειρησιακής έρευνας, άρχισαν να αναπτύσσουν διάφορες τεχνικές οι οποίες παρείχαν καλές λύσεις ακόμα και αν το πρόβλημα δεν ήταν αποδεδειγμένα βέλτιστο ή και σχεδόν βέλτιστο. Μερικές από αυτές τις τεχνικές έγιναν γνωστές ως «ευρετικές μεθόδοι» με την πιο διαδεδομένη από αυτές τις τεχνικές να είναι η *‘αναζήτηση του εγγύτερου γείτονα’*, η οποία χρησιμοποιείται για να επιλύσει ένα ευρύτερο φάσμα συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Η μέθοδος αυτή έχει σημαντική επιρροή και στις μετα-ευρετικές μεθόδους, καθώς το βασικό της χαρακτηριστικό είναι ότι εξετάζει όλους τους ‘γείτονες’ της υπάρχουσας λύσης ως πιθανές λύσεις του προβλήματος.

Στην πορεία των χρόνων έγιναν και άλλες μελέτες στον τομέα της επιχειρησιακής έρευνας καθώς ξεχώρισε η μελέτη του Lin (1965) ο οποίος κατάφερε να δώσει λύση στο «Πρόβλημα του Πλανόδιου Πωλητή» διερευνώντας γειτονιές οι οποίες σχηματίζονται από τη διάσπαση οποιωνδήποτε τριών συνδέσμων του ταξιδιού και την επανασύνδεση αυτών. Στη λογική της έρευνας του Lin στηρίχθηκαν οι Robert και Flores (1966), οι οποίοι χρησιμοποίησαν μία παρόμοια τεχνική, σχετική με αυτή του Lin, για να λύσουν το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή. Όμως, μέχρι να εμφανιστούν οι γενετικοί αλγόριθμοι στον τομέα της επιχειρησιακής έρευνας τη δεκαετία του 1990, η γενική ιδέα των τεχνικών αυτών δεν υιοθετήθηκε στην μεθοδολογία του τομέα αυτού και λίγες έρευνες έγιναν αξιοποιώντας αυτές τις τεχνικές.

3.3.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι αναφέρονται σε άτομα (individuals) ή γενότυπους (genotypes) μέσα σε έναν πληθυσμό. Κάθε άτομο ή γενότυπος αποτελείται από χρωμοσώματα (chromosomes), τα οποία αποτελούνται από γονίδια (genes) διατεταγμένα σε γραμμική ακολουθία, ενώ για τους αλγορίθμους αυτούς τα άτομα έχουν ένα μόνο χρωμόσωμα. Κάθε γενότυπος αναπαριστά μία πιθανή λύση σε ένα πρόβλημα, ενώ το αποκωδικοποιημένο περιεχόμενο ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος καλείται φαινότυπος (phenotype). Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι γενικά διατηρούν έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων του εξεταζόμενου προβλήματος, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους που επεξεργάζονται μόνο ένα σημείο του διαστήματος αναζήτησης. Για αυτό το λόγο το προνόμιο που έχουν οι αλγόριθμοι αυτοί σε σχέσεις με άλλες μεθόδους είναι ότι πραγματοποιούν αναζητήσεις σε πολλές κατευθύνσεις και υποστηρίζουν καταγραφή και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ αυτών των κατευθύνσεων (Γεωργόπουλος και Λυκοθανάσης, 1999).

Γενικά οι Γενετικοί Αλγόριθμοι καλούνται να λύσουν προβλήματα που διατυπώνονται ως εξής:

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε έναν διακριτό χώρο αναζήτησης X και μία συνάρτηση f όπου:

$$f: X \rightarrow \mathbb{R}$$

Το γενικό πρόβλημα είναι να βρούμε την τιμή του x όπου το f παρουσιάζει ελάχιστο, δηλαδή:

$$\arg \min_{x \in X} f$$

Στην περίπτωση αυτή το x είναι ένα διάνυσμα μεταβλητών αποφάσεων και το f είναι η αντικειμενική συνάρτηση, καθώς κάνουμε την υπόθεση ότι πρόκειται για ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης. Αν όμως πρόκειται για πρόβλημα μεγιστοποίησης γίνονται οι απαραίτητες τροποποιήσεις. Ένα τέτοιο πρόβλημα ονομάζεται συνήθως διακριτό ή Συνδυαστικό Πρόβλημα Βελτιστοποίησης (Combinatorial Optimization Problem).

Ένα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της προσέγγισης των Γενετικών Αλγορίθμων, είναι ότι επιτρέπει το διαχωρισμό της αναπαράστασης του προβλήματος από τις πραγματικές μεταβλητές με βάση τις οποίες διατυπώθηκε.

3.3.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

Όπως προαναφέρθηκε οι Γενετικοί Αλγόριθμοι παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις άλλες μεθόδους αναζήτησης και βελτιστοποίησης στις λύσεις των προβλημάτων (Σπυρίδων Λυκοθανάσης, 2001). Σύμφωνα με τον D. Goldberg (1989) τα νέα χαρακτηριστικά που τους διαφοροποιούν ως προς τις άλλες μεθόδους και τα οποία συμβάλλουν καθοριστικά ώστε οι Γ.Α. να έχουν την ιδιότητα της ευρωστίας (ισχύς) είναι τα παρακάτω:

- Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι δουλεύουν με μία κωδικοποίηση του συνόλου τιμών που μπορούν να λάβουν οι μεταβλητές και όχι με τις ίδιες μεταβλητές του προβλήματος.
- Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι κάνουν αναζήτηση σε πολλά σημεία ταυτόχρονα και όχι μόνο σε έναν. Ειδικότερα, σε αρκετές μεθόδους βελτιστοποίησης η επεξεργασία γίνεται βήμα προς βήμα, από σημείο σε σημείο ορισμού του προβλήματος. Όμως, η επεξεργασία από βήμα σε βήμα κρύβει αρκετούς κινδύνους και ο πιο σημαντικός από αυτούς είναι ο περιορισμός της αναζήτησης σε μία περιοχή τοπικού ακρότατου που δεν είναι ολικό. Στην περίπτωση αυτή οι Γ.Α εξαλείφουν αυτόν τον κίνδυνο ενεργώντας ταυτόχρονα πάνω σε ένα ευρύ σύνολο συμβολοσειρών. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να 'ανέβουν' πολλούς λόφους (hill climbing) την ίδια στιγμή, ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα να βρουν μία λάθος κορυφή.
- Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι χρησιμοποιούν μόνο την αντικειμενική συνάρτηση και καμία επιπρόσθετη πληροφορία. Αξιοποιούν μόνο τις πληροφορίες που παρέχει η αντικειμενική συνάρτηση, κάτι το οποίο δίνει στους Γ.Α μεγάλη ευελιξία. Για τις βοηθητικές πληροφορίες έχουν αναπτυχθεί μορφές Γ.Α (Knowledge-Based Genetic Algorithms) που αξιοποιούν τέτοιου είδους πληροφορίες.
- Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι χρησιμοποιούν πιθανοθεωρητικούς κανόνες μετάβασης και όχι ντετερμινιστικούς. Η χρήση των κανόνων μετάβασης είναι σημαντικό χαρακτηριστικό των Γ.Α, αλλά αυτό δεν σημαίνει ότι η διαδικασία βασίζεται στην τύχη.

3.3.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

Η χρήση των Γενετικών Αλγορίθμων για την επίλυση των προβλημάτων παρουσιάζει πάρα πολλά σημαντικά πλεονεκτήματα, μερικά από τα οποία είναι τα παρακάτω (Γεωργόπουλος και Λυκοθανάσης, 1999):

- Μπορούν να επιλύσουν πολύπλοκα και δύσκολα προβλήματα σε μικρό χρονικό διάστημα και να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα. Αξίζει να αναφερθεί ότι από τους σημαντικότερους λόγους χρήσης των Γενετικών Αλγορίθμων είναι η αποδοτικότητα αυτών. Έχει αποδειχθεί πολλές φορές ότι προβλήματα που έχουν πολλές προσδιορισμένες λύσεις αντιμετωπίζονται καλύτερα με τη χρήση των Γ.Α, καθώς διάφορες συναρτήσεις που παρουσιάζουν συνεχώς διακυμάνσεις και καθιστούν ανεπαρκείς άλλες μεθόδους στην εύρεση των ακροτάτων τους, για τους Γ.Α δεν αποτελούν σημεία δυσχέρειας.
- Συνεργάζονται εύκολα με υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα. Είναι σημαντικό ότι οι Γενετικοί Αλγόριθμοι προσφέρουν το πλεονέκτημα της χρήσης τους στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται σήμερα και συνεπώς δεν χρειάζεται η επανασχεδίαση αυτών. Συνεργάζονται εύκολα με τον κώδικα, αφού χρησιμοποιούν πληροφορίες της συνάρτησης που πρόκειται να βελτιστοποιήσουν, χωρίς να είναι απαραίτητη η συμμετοχή του ρόλου της μέσα στη δομή του συστήματος.
- Έχουν τη δυνατότητα της γρήγορης εξέλιξης και επεκτασιμότητας. Πιο συγκεκριμένα οι Γ.Α δεν αντιστέκονται σε πιθανές αλλαγές επεκτάσεις ή μετεξελίξεις, αλλά αυτό σχετίζεται και με την κρίση του σχεδιαστή. Βέβαια σε πολλές εφαρμογές έχουν αναφερθεί λειτουργίες των Γενετικών Αλγορίθμων οι οποίες έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές ως προς όφελος της απόδοσης. Επίσης σε ορισμένες περιπτώσεις επιβάλλονται υποχρεωτικά παραλλαγές στο βασικό σχήμα.

- Πολλές φορές εμφανίζονται σε υβριδική μορφή με άλλες μεθόδους. Παρόλο που η ισχύς των Γ.Α είναι αρκετά μεγάλη καθώς και της μεγάλης ευελιξίας αυτών, σε ειδικές περιπτώσεις προβλημάτων στις οποίες άλλες μέθοδοι έχουν υψηλότερη αποδοτικότητα λόγω εξειδίκευσης, δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ένα υβριδικό σχήμα Γ.Α με άλλη μέθοδο.
- Σε σχέση με άλλες μεθόδους οι Γ.Α μπορούν να εφαρμοστούν σε περισσότερα πεδία. Μάλιστα το χαρακτηριστικό που έχουν το οποίο τους δίνει αυτό το πλεονέκτημα, είναι η ελευθερία της επιλογής των κριτηρίων όπου καθορίζουν την βασική επιλογή μέσα στο τεχνικό περιβάλλον. Επομένως, αυτό συνεπάγεται στη χρήση των Γ.Α στη οικονομία, στο σχεδιασμό μηχανών, στην εκπαίδευση Νευρωνικών Δικτύων, στην επίλυση μαθηματικών εξισώσεων και σε διάφορους άλλους τομείς.
- Σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι οι συναρτήσεις που επεξεργάζονται δεν απαιτούν περιορισμούς. Οι παραδοσιακές μέθοδοι καθίστανται πολλές φορές δύσκαμπτες και ακατάλληλες για πολλά προβλήματα, καθώς απαιτούν την ύπαρξη περιορισμών, παραγώγων και την ύπαρξη μη 'θορυβωδών' συναρτήσεων. Για αυτό σε αυτή την περίπτωση είναι απαραίτητη η χρήση των Γ.Α για τους οποίους τέτοιες ιδιότητες είναι αδιάφορες, πράγμα που τους κάνει κατάλληλους για μεγάλο φάσμα προβλημάτων.
- Δεν λαμβάνουν υπόψη τη σημασία της υπό εξέταση πληροφορίας, καθώς ο Γ.Α μέσα στο περιβάλλον επικοινωνεί μόνο με την αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό συνεπάγεται στην εγγύηση του προβλήματος ανεξάρτητα από τη σημασία του προβλήματος, αλλά δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχουν και άλυτα προβλήματα. Στην περίπτωση αδυναμίας της επιτυχούς αντιμετώπισης του προβλήματος, αιτία είναι η φύση του χώρου που ερευνούν και όχι το πληροφοριακό περιεχόμενο του προβλήματος.

- Έχουν το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό, αυτό του παραλληλισμού και αυτό γιατί σε κάθε τους βήμα επεξεργάζονται μεγάλες ποσότητες πληροφοριών. Πιο συγκεκριμένα έχει υπολογιστεί ότι η αναλογία αυτή είναι της τάξης $O(n^3)$, όπου 10 άτομα αντιπροσωπεύουν περίπου 1000. Άρα συμπεραίνουμε ότι μπορούν να καλύψουν με αποδοτικό ψάξιμο μεγάλους χώρους σε μικρούς χρόνους.
- Οι Γ.Α εξερευνούν ταυτόχρονα το χώρο αναζήτησης και εκμεταλλεύονται την ήδη επεξεργασμένη πληροφορία. Τονίζεται ότι με τυχαίο ψάξιμο γίνεται μεν καλή εξερεύνηση του χώρου αλλά δεν γίνεται σωστή εκμετάλλευση της πληροφορίας σε σχέση με το hill-climbing όπου γίνεται το ανάποδο. Βέβαια ο συνδυασμός αυτός συναντάται πολύ σπάνια σε οποιαδήποτε άλλη μέθοδο. Επειδή αυτά τα δύο είναι ανταγωνιστικά μεταξύ τους, καλό θα ήταν να συνυπάρχουν και τα δύο προς όφελος της διαδικασίας. Και ο λόγος που οι Γ.Α είναι ιδιαίτερα αποδοτικοί και ελκυστικοί, είναι επειδή επιτυγχάνουν το βέλτιστο συνδυασμό εξερεύνησης και εκμετάλλευσης.
- Μπορούν να υποστούν παράλληλη υλοποίηση. Πιο συγκεκριμένα, λόγω της φύσης τους, όπου μπορούν να δεχτούν παράλληλη υλοποίηση, οι Γ.Α εκμεταλλεύονται τα πλεονεκτήματα των παράλληλων μηχανών, κάτι το οποίο εμφανίζεται σπανιότερα σε ανταγωνιστικές μεθόδους. Και αυτό το στοιχείο είναι ο λόγος που αυξάνει όλο ένα και περισσότερο την απόδοσή τους.

3.3.6 ΚΥΡΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ/ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Γενικά οι Γενετικοί Αλγόριθμοι εμπεριέχουν λειτουργίες οι οποίες χαρακτηρίζονται από μεγάλη απλοϊκότητα και ισχύς και αυτός είναι ο λόγος που ξεχωρίζουν σε σχέση με άλλες μεθόδους. Η εφαρμογή ενός Γ.Α χωρίζεται σε δύο στάδια, όπου στο πρώτο στάδιο περιγράφονται τα στοιχεία που συνδέουν το πρόβλημα με τον Γ.Α και στο δεύτερο στάδιο οι γενετικές διαδικασίες, δηλαδή οι λειτουργίες που εμπεριέχονται στη φάση τρεξίματος του Γ.Α. Όλα αυτά τα στοιχεία είναι που κάνουν τον αλγόριθμο γενετικό.

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα το μοντέλο σε πρώτο στάδιο υλοποιήθηκε προγραμματιστικά στην Visual Basic έτσι ώστε να μπορέσει να γίνει μία εκτίμηση των αποτελεσμάτων. Έπειτα, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Evolver μέσω του οποίου έγιναν μερικά 'πειράματα' χρησιμοποιώντας κάποιες παραμέτρους για να προκύψει η όσο το δυνατόν καταλληλότερη λύση. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι ο συντελεστής διασταύρωσης, ο συντελεστής μετάλλαξης και ο πληθυσμός. Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία εφαρμογής του αλγορίθμου για κάθε στάδιο ξεχωριστά:

i. **Πρώτο Στάδιο**

Όπως προαναφέρθηκε είναι απαραίτητο σε έναν Γ.Α να υπάρχουν στοιχεία που τον συνδέουν με το υπό μελέτη πρόβλημα, όπως είναι για παράδειγμα η κωδικοποίηση και η αντικειμενική συνάρτηση που αποτελούν κύρια συστατικά για έναν Γ.Α και ολοκληρώνουν το πρώτο στάδιο εφαρμογής. Το στάδιο αυτό είναι ανεξάρτητο από το επόμενο στάδιο και έχει τη δική του αυτονομία. Παρακάτω αναλύεται η κάθε μία έννοια ξεχωριστά:

➤ **Κωδικοποίηση**

Το κύριο στοιχείο της κωδικοποίησης είναι η αναπαράσταση των επιμέρους χαρακτηριστικών των λύσεων του προβλήματος. Το στάδιο αυτό περιέχει ένα μεγάλο σύνολο πιθανών λύσεων του προβλήματος. Επομένως με βάση τις αρχικές εκτιμήσεις στην Visual Basic μία λύση (χρωμοσώματα) θα μπορούσε να είναι η παρακάτω για κάθε σταθμό:

(2 → 15 → 5 → 10 → 13 → 12 → 3 → 8 → 7 → 9 → 1 → 14 → 11 → 4 → 6 → Μετρό Δάφνη)

(15 → 8 → 9 → 7 → 1 → 6 → 3 → 10 → 2 → 11 → 4 → 14 → 12 → 13 → 5 → Μετρό Άγιος Ιωάννης)

(15 → 5 → 10 → 6 → 4 → 7 → 11 → 9 → 2 → 1 → 3 → 13 → 14 → 8 → 12 → Μετρό Άγιος Δημήτριος)

Πιο συγκεκριμένα τα λεωφορεία σε κάθε διαδρομή θα διασχίζουν τις στάσεις με βάση την παραπάνω σειρά και θα καταλήγουν, αφού έχουν διασχίσει όλες τις στάσεις, στους σταθμούς μετρό με βάση την αντίστοιχη διαδρομή κάθε φορά.

Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι η κωδικοποίηση αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα στην εφαρμογή ενός Γ.Α, καθώς οποιοδήποτε λάθος συνεπάγεται στην αποτυχία του Γ.Α. Επιπρόσθετα, τονίζεται ότι υπάρχουν πολλές μορφές κωδικοποίησης ωστόσο, η οποιαδήποτε μορφή κωδικοποίησης δεν σημαίνει ότι είναι αποτελεσματική για τα προβλήματα, ενώ σε μερικά από αυτά μπορεί να χρειάζονται και παραπάνω από μία μορφή κωδικοποίησης.

➤ Αντικειμενική Συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει ως είσοδο μία αποκωδικοποιημένη συμβολοσειρά και επιστρέφει συνήθως μία πραγματική τιμή, η οποία δείχνει πόσο αποτελεσματικά λύνει η συμβολοσειρά το πρόβλημα. Τονίζεται πως μέσω αυτής της τιμής καθορίζεται η επιβίωση και ο πολλαπλασιασμός του ατόμου.

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η μοναδική πληροφορία που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος για να λύσει το πρόβλημα, καθώς αποτελεί το περιβάλλον του τεχνικού μοντέλου. Επομένως, πρέπει η συνάρτηση αυτή να υπολογίζεται εύκολα έτσι ώστε να μην επιβραδύνει τη διαδικασία.

Όλες οι πιθανές λύσεις που προαναφέρθηκαν θα αξιολογηθούν ως προς την αντικειμενική συνάρτηση η οποία έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς μέσω των ελάχιστων διαδρομών.

$$\min \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} \sum_{k \in W} (C_{ijk} X_{ijk}) \cdot D_{ijk} + \sum_{j \in C} \sum_{k \in W} X_{0jk} \quad (1)$$

ii. Δεύτερο Στάδιο

Στο στάδιο αυτό ανήκουν οι λειτουργίες που αφορούν τη φάση του τρεξίματος του αλγορίθμου. Οι λειτουργίες που ανήκουν σε αυτό το στάδιο, συνιστούν τη δομή του Γ.Α και δεν εξαρτώνται από την αναπαράσταση των ατόμων στο τεχνητό περιβάλλον, αλλά ούτε και από τον τρόπο αξιολόγησης των ικανοτήτων τους. Οι λειτουργίες αυτές αναλύονται παρακάτω:

❖ Αρχικοποίηση (Initialization)

Η λειτουργία αυτή αφορά το πρώτο βήμα, όπου ορίζεται ο αρχικός πληθυσμός και πάνω σε αυτήν θα λάβουν χώρα και οι υπόλοιπες. Όπως έγινε γνωστό από τις προηγούμενες ενότητες, η εφαρμογή ενός Γ.Α απαιτεί πάρα πολλές αποφάσεις. Η πρώτη απόφαση που πρέπει να πάρει κανείς αφορά τον πληθυσμό, όπου έχει δύο κριτήρια και τα οποία είναι α) ποιο θα είναι το μέγεθος του πληθυσμού και β) και ποια θα είναι η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί έτσι ώστε να επιλεγεί το αντιπροσωπευτικό δείγμα. Το μέγεθος του πληθυσμού έχει προσεγγιστεί γενικά από διάφορες θεωρητικές απόψεις, αλλά συνήθως επιλέγεται αξιολογώντας τόσο την αποδοτικότητα όσο και την αποτελεσματικότητα. Γενικά θα πρέπει να υπάρχει μία βέλτιστη τιμή για ένα δεδομένο μήκος χορδών (string length), διότι όταν θα έχουμε μικρό πληθυσμό δεν θα είναι δυνατή η πλήρης αποτελεσματική εξερεύνηση το χώρου αναζήτησης, αλλά και όταν θα έχουμε μεγάλο πληθυσμό θα επηρεάζεται η αποτελεσματικότητα της μεθόδου καθώς δεν θα δίνει λύσεις σε σύντομο χρονικό διάστημα. Ο πληθυσμός γενικά διαλέγεται με τυχαίο τρόπο ανάμεσα σε όλες τις τιμές των μεταβλητών που αποτελείται το πρόβλημα και το μέγεθος από το σχεδιαστή του προβλήματος. Όμως σε κάποιες εφαρμογές, τα αρχικά σημεία επιλέγονται από ευρετικές μεθόδους οι οποίες δίνουν ένα παραπάνω πλεονέκτημα στην αναζήτηση. Τέλος, προκύπτοντας η πρώτη γενιά, ο Γενετικός Αλγόριθμος μπαίνει σε επαναληπτική διαδικασία. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, τα μεγέθη των πληθυσμών που επιλέχθηκαν έχουν τις τιμές 25, 50, 75 και ο λόγος που επιλέχθηκαν τρεις τιμές είναι για να δούμε πόσο αποκλίνουν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης μεταξύ τους.

❖ Αποκωδικοποίηση (Decoding)

Στο δεύτερο στάδιο έχουμε την αποκωδικοποίηση των χαρακτηριστικών των ατόμων και τον υπολογισμό της απόδοσης αυτών έτσι ώστε να αξιολογηθεί ο πληθυσμός, δηλαδή να αξιολογηθεί η ικανότητα επιβίωσης του κάθε ατόμου ξεχωριστά. Η διαδικασία της αποκωδικοποίησης είναι παρόμοια με αυτή του φυσικού μοντέλου, όπου τα γονίδια των χρωμοσωμάτων εμπεριέχουν την κωδικοποιημένη γενετική πληροφορία που ονομάζεται γενότυπος. Στο τεχνητό όμως μοντέλο, στη θέση του γενότυπου είναι η δομή της συμβολοσειράς και στη θέση των γονιδίων είναι τα δυαδικά ψηφία. Επίσης έχουμε και τον φαινότυπο όπου δείχνει το πώς φαίνεται η συμβολοσειρά στο περιβάλλον, το οποίο περιβάλλον είναι η αντικειμενική συνάρτηση, επομένως ο φαινότυπος ανήκει στην αποκωδικοποιημένη τιμή της συμβολοσειράς, η οποία ανήκει στο σύνολο ορισμού της συνάρτησης.

❖ Υπολογισμός Ικανότητας ή Αξιολόγησης (Fitness Calculation or Evaluation)

Στο τρίτο στάδιο αφού έχει γίνει η αποκωδικοποίηση των χαρακτηριστικών των ατόμων, θα αξιολογηθεί ο πληθυσμός και θα υπολογιστεί για κάθε άτομο του πληθυσμού η ικανότητα για επιβίωση, δηλαδή μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης θα αξιολογηθεί η απόδοση κάθε ατόμου του πληθυσμού. Η διαδικασία αυτή ισχύει για τα απλά προβλήματα, ενώ για πιο σύνθετα προβλήματα η ικανότητα υπολογίζεται από προσομοιώσεις που γίνονται σε εργαστήρια. Συμπεραίνεται ότι ο υπολογισμός της ικανότητας γενικά αποτελεί θεμελιώδη λειτουργία για έναν Γ.Α.

❖ Αναπαραγωγή (Reproduction)

Αφού έχουν γίνει οι παραπάνω τρεις λειτουργίες, ακολουθεί η σημαντικότερη λειτουργία του Γ.Α, στην οποία πραγματοποιείται η βασική εργασία του αλγορίθμου. Η λειτουργία αυτή είναι η «Αναπαραγωγή» και περιλαμβάνει τρία μέρη: i) την επιλογή

(selection), η οποία πραγματοποιείται σαν πρώτο βήμα πριν τη διαδικασία της αναπαραγωγής, ii) τη διασταύρωση (crossover ή mating) και iii) τη μετάλλαξη (mutation).

i. Επιλογή (Selection)

Στη διαδικασία της επιλογής στηρίζεται ο νόμος της επιβίωσης του ικανότερου, όπου μέσω αυτής της διαδικασίας επιλέγονται τα άτομα του υπάρχοντος πληθυσμού που θα συμμετέχουν στη διαδικασία της αναπαραγωγής και τα οποία θα μεταφέρουν τα χαρακτηριστικά τους στην επόμενη γενιά. Στόχος της επιλογής είναι η εκθετική αύξηση των ικανότερων ατόμων και η επικράτηση αυτών. Στην περίπτωση που κάποιος αλγόριθμος δεν περιλαμβάνει τη διαδικασία της επιλογής, τότε επιλέγονται τυχαία τα άτομα.

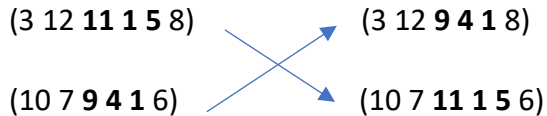
Επομένως σε αυτό το στάδιο έχοντας υπολογιστεί η απόδοση κάθε ατόμου του πληθυσμού με βάση το νόμο του 'ικανότερου ατόμου' θα επιλεχθούν τα άτομα εκείνα με την μεγαλύτερη απόδοση και θα μεταφέρουν τα χαρακτηριστικά τους στην επόμενη γενιά.

ii. Διασταύρωση (Crossover or Mating)

Έχοντας γίνει η διαδικασία της επιλογής, ακολουθεί το στάδιο της διασταύρωσης όπου εφαρμόζεται ο τελεστής διασταύρωσης και ο πληθυσμός που προέκυψε από το στάδιο της επιλογής περνάει τη φάση του ζευγαρώματος για να πραγματοποιήσει μία γονιμοποίηση. Πιο συγκεκριμένα τα άτομα του πληθυσμού θα ζευγαρώσουν με τυχαίο τρόπο ανά δύο. Η διασταύρωση ουσιαστικά αφορά την ανταλλαγή γενετικού υλικού ανάμεσα σε δύο μέλη κάθε ομάδας ατόμων. Ο βασικός στόχος αυτής της λειτουργίας είναι η νέα γενιά ατόμων που θα προκύψει να περιλαμβάνει άτομα διαφορετικά από του γονείς τους, τα οποία θα περιέχουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά αυτών, μέσω των οποίων θα μπορέσουν να προκύψουν επιτυχημένοι συνδυασμοί υψηλής ικανότητας.

Βέβαια να αναφερθεί ότι μπορεί να δοθούν άτομα χειρότερα από τους γονείς τους τα οποία στη συνέχεια δεν θα πολλαπλασιαστούν λόγω της μικρότερης απόδοσής τους.

Το πόσο συχνά θα γίνεται διασταύρωση εξαρτάται από τις τιμές 0 έως 1 με βάση τις οποίες θα βαθμονομηθεί το μοντέλο προτού γίνει η βελτιστοποίηση. Ένα παράδειγμα είναι το παρακάτω με βάση τα χρωμοσώματα της εργασίας:



Ουσιαστικά το ένα κομμάτι του χρωμοσώματος παραμένει στην ίδια σειρά με αυτή πριν από τη διασταύρωση στους απόγονους.

Η διασταύρωση αποτελεί εξίσου σημαντική λειτουργία που συμβάλλει στην επίδοση ενός Γ.Α, καθώς υπάρχουν πολλοί τρόποι υλοποίησης, μερικοί από τους οποίους εφαρμόζονται σε όλων των ειδών προβλήματα ενώ άλλοι τρόποι σε πιο εξεζητημένα προβλήματα.

iii. Μετάλλαξη (Mutation)

Η τελευταία διαδικασία στο στάδιο της αναπαραγωγής είναι η μετάλλαξη κατά την οποία εφαρμόζεται ο τελεστής της μετάλλαξης, ο δεύτερος κατά σειρά τελεστής που εμφανίζεται στα χρωμοσώματα. Η λειτουργία αυτή δρα κάθε φορά σε έναν οργανισμό μόνο. Πιο συγκεκριμένα γίνεται αντιγραφή των δυαδικών ψηφίων από τον γονέα στον απόγονο και μέσω της πιθανότητας μετάλλαξης p_m (mutation probability) επιλέγεται ένα οποιοδήποτε στοιχείο και αντιστρέφεται. Καλό θα ήταν η πιθανότητα να γίνει η μετάλλαξη να είναι μικρή, δηλαδή να γίνεται μία μετάλλαξη στα χίλια ψηφία περίπου, διότι εάν πραγματοποιείται συνεχώς μετάλλαξη ο Γενετικός Αλγόριθμος θα βρίσκεται συνεχώς σε τυχαίο ψάξιμο.

Το πόσο συχνά θα γίνεται μετάλλαξη εξαρτάται από τις τιμές 0 έως 1 και προτιμώνται χαμηλές τιμές της τάξεως 0.05 έως 0.25 (με βάση το λογισμικό Evolver) για να μην

βρίσκεται ο αλγόριθμος συνεχώς σε τυχαίο ψάξιμο. Ένα παράδειγμα είναι το παρακάτω με βάση τα χρωμοσώματα της εργασίας:

(2 → 15 → 5 → 10 → 13 → 12 → 8) → (2 → 8 → 5 → 10 → 13 → 12 → 15)

Τα υπόλοιπα γονίδια παραμένουν στην ίδια σειρά με πριν τη μετάλλαξη.

Η μετάλλαξη αποτελεί σημαντική λειτουργία για τη δομή ενός Γ.Α καθώς παίζει το ρόλο της ασφαλιστικής δικλείδας στις περιπτώσεις όπου η επιλογή και η διασταύρωση χάνουν μερικές απαραίτητες γενετικές πληροφορίες, ενώ αυτό που καταφέρνει είναι ότι εξασφαλίζει πως κανένα σημείο του χώρου αναζήτησης δεν αποκλείεται κατά τη διαδικασία του ψαξίματος.

❖ Επανατοποθέτηση και Τερματισμός (Reinsertion and Termination)

Αφού ολοκληρωθεί το στάδιο της αναπαραγωγής τα χρωμοσώματα που παράγονται τελικά, επανατοποθετούνται στον παλαιό (αρχικό) πληθυσμό και δημιουργείται ένας νέος πληθυσμός με νέα χρωμοσώματα τα οποία έχουν διατηρήσει σταθερό το μέγεθος του πληθυσμού. Σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία ολοκληρώνεται μία επανάληψη (γενεά) ενός Γ.Α και ο αλγόριθμος συνεχίζει τις επαναλήψεις έως ότου ικανοποιηθούν ένα από τα δύο κριτήρια του τερματισμού, τα οποία είναι α) προκαθορισμένος αριθμός επαναλήψεων και β) προκαθορισμένη ακρίβεια βελτιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης.

Παρακάτω παρουσιάζεται σχηματικά η δομή ενός τυπικού αλγορίθμου με βάση όλα τα παραπάνω:



Εικόνα 7: Η βασική δομή ενός τυπικού Γενετικού Αλγορίθμου (Πηγή: Κεφάλαιο 3: Εξελικτικός Υπολογισμός)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτή την ενότητα, θα γίνει η βελτιστοποίηση και θα αναλυθούν και θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τη διαδικασία αυτή, καθώς θα επιλεγεί η βέλτιστη λύση μέσω της οποίας θα προκύψουν οι διαδρομές για κάθε έναν από τους τρεις σταθμούς μετρό. Επίσης θα πραγματοποιηθεί μία ανάλυση ευαισθησίας, αλλάζοντας τις τιμές κάποιων παραμέτρων της βέλτιστης λύσης του προβλήματος, έτσι ώστε να δούμε κατά πόσο μεταβάλλονται τα αποτελέσματα αυτής σε σύγκριση με αυτά που θα προκύψουν.

4.2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Η περιοχή στην οποία θα εφαρμοστεί το μοντέλο, βρίσκεται στην Περιφερειακή Ενότητα του Νοτίου Τομέα των Αθηνών. Πιο συγκεκριμένα, η περιοχή περιέχει τους 3 σταθμούς μετρό «*Δάφνη*», «*Άγιο Δημήτριο*» και «*Άγιο Ιωάννη*» και τις 15 στάσεις από τις οποίες θα περάσουν τα αυτόνομα λεωφορεία και θα καταλήξουν στους σταθμούς μετρό. Η περιοχή απεικονίζεται παρακάτω με τις στάσεις (πράσινο) και τους σταθμούς μετρό (κόκκινο):

Επίσης, δημιουργήθηκαν τα κατάλληλα μητρώα που περιλαμβάνουν τις αποστάσεις μεταξύ των στάσεων και την απόσταση αυτών από τους τρεις σταθμούς μετρό, σε χιλιόμετρα (km) και με βάση την ταχύτητα προέκυψαν τα αντίστοιχα μητρώα που περιλαμβάνουν τους αντίστοιχους χρόνους μεταξύ των στάσεων και τους χρόνους αυτών από τους σταθμούς μετρό, σε ώρες (h).

Τα 6 μητρώα αυτά (2 για κάθε σταθμό) απεικονίζονται παρακάτω:

Πίνακας 2: Αποστάσεις μεταξύ των στάσεων και των στάσεων από το σταθμό μετρό Δάφνη (km)

	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 3: Αποστάσεις μεταξύ των στάσεων και των στάσεων από το σταθμό μετρό Άγιος Ιωάννης (km)

	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 4: Αποστάσεις μεταξύ των στάσεων και των στάσεων από το σταθμό μετρό Άγιος Δημήτριος (km)

	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 5: Χρόνοι μεταξύ των στάσεων και των στάσεων από το σταθμό μετρό Δάφνη (h)

	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 6: Χρόνοι μεταξύ των στάσεων και των στάσεων από το σταθμό μετρό Άγιος Ιωάννης (h)

	TravelTimes(h)	ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ	6Η ΑΙΓΑΙΟΥ	8Η ΑΡΤΑΚΗΣ	ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ	ΛΟΥΤΡΑ	10Η ΑΡΤΑΚΗΣ	ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ	ΙΑΣΩΝΟΣ	ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ	ΑΙΝΟΥ	ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ	ΜΟΥΡΙΚΗ	3Η ΠΑΠΑΓΟΥ	ΣΧΟΛΕΙΟ	ΠΑΝΑΠΙΣΤΑ	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
ΠΑΝΑΠΙΣΤΑ	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 7: Χρόνοι μεταξύ των στάσεων και των στάσεων από το σταθμό μετρό Άγιος Δημήτριος (h)

	TravelTimes(h)	ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ	6Η ΑΙΓΑΙΟΥ	8Η ΑΡΤΑΚΗΣ	ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ	ΛΟΥΤΡΑ	10Η ΑΡΤΑΚΗΣ	ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ	ΙΑΣΩΝΟΣ	ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ	ΑΙΝΟΥ	ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ	ΜΟΥΡΙΚΗ	3Η ΠΑΠΑΓΟΥ	ΣΧΟΛΕΙΟ	ΠΑΝΑΠΙΣΤΑ	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
ΠΑΝΑΠΙΣΤΑ	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

Επίσης απεικονίζεται παρακάτω η ζήτηση που χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση για κάθε μία στάση προς κάθε σταθμό μετρό. Η ζήτηση προέκυψε με βάση την χωρητικότητα των αυτόνομων λεωφορείων με τυχαίο τρόπο έτσι ώστε να μην υπερβαίνει 'κατά πολύ' τη χωρητικότητα και δημιουργήσει προβλήματα στη βελτιστοποίηση.

Πίνακας 8: Ζήτηση προς τους σταθμούς μετρό (passengers)

	ΜΕΤΡΟ ΔΑΦΝΗ	ΜΕΤΡΟ ΑΓΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ	ΜΕΤΡΟ ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ	1	15	18
6Η ΑΙΓΑΙΟΥ	2	1	1
8Η ΑΡΤΑΚΗΣ	10	7	19
ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ	9	14	14
ΛΟΥΤΡΑ	8	17	5
10Η ΑΡΤΑΚΗΣ	2	12	15
ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ	19	9	19
ΙΑΣΩΝΟΣ	3	1	2
ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ	1	13	9
ΑΙΝΟΥ	7	3	5
ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ	11	7	9
ΜΟΥΡΙΚΗ	1	3	5
3Η ΠΑΠΑΓΟΥ	2	15	7
ΣΧΟΛΕΙΟ	7	3	18
ΠΑΝΑΓΙΤΣΑ	17	2	19

Όσον αφορά τα κόστη για τις αποστάσεις μετρήθηκαν οι διάρκειες των αποστάσεων από το αμαξοστάσιο προς κάθε στάση ξεχωριστά, μέσω του google maps και θεωρήθηκαν σταθερές για όλες τις στάσεις καθώς λήφθηκαν υπόψη διάφοροι παράγοντες για τη θεώρηση αυτή όπως είναι η περίπτωση να υπάρχει κίνηση στους δρόμους. Έτσι η διάρκεια από το αμαξοστάσιο μέχρι κάθε στάση ξεχωριστά ισούται με 0.3 (h) ή 18 min περίπου.

Επίσης λήφθηκε υπόψη και ο χρόνος εξυπηρέτησης των επιβατών, ο οποίος θεωρήθηκε ότι είναι σταθερός για κάθε στάση και κάθε φορά θα πολλαπλασιάζεται με του επιβάτες που βρίσκονται στην υπό μελέτη στάση. Έτσι σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Charisis et al., 2018), εκτιμήθηκε ότι ο χρόνος επιβίβασης θα ισούται με: **Service Time = (4 + 3.8 * Demand)/3600**. Πιο συγκεκριμένα ο όρος 4 αναφέρεται στα δευτερόλεπτα που παραμένει το λεωφορείο στη στάση, ο όρος 3.8 στα δευτερόλεπτα που χρειάζεται ο επιβάτης για να εισέλθει στο λεωφορείο μαζί με το άνοιγμα και το κλείσιμο της πόρτας και ο όρος 3600 δείχνει την αναγωγή στην ώρα. Έτσι με βάση τα παραπάνω και με βάση τη ζήτηση απεικονίζεται παρακάτω ο χρόνος εξυπηρέτησης των επιβατών (σε ώρες) σε κάθε στάση προς κάθε σταθμό μετρό ξεχωριστά:

Πίνακας 9: Χρόνος εξυπηρέτησης των επιβατών σε κάθε στάση προς κάθε σταθμό μετρό (h)

	ΜΕΤΡΟ ΔΑΦΝΗ	ΜΕΤΡΟ ΑΓΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ	ΜΕΤΡΟ ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ	0,0022	0,0169	0,0201
6Η ΑΙΓΑΙΟΥ	0,0032	0,0022	0,0022
8Η ΑΡΤΑΚΗΣ	0,0117	0,0085	0,0212
ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ	0,0106	0,0159	0,0159
ΛΟΥΤΡΑ	0,0096	0,0191	0,0064
10Η ΑΡΤΑΚΗΣ	0,0032	0,0138	0,0169
ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ	0,0212	0,0106	0,0212
ΙΑΣΩΝΟΣ	0,0043	0,0022	0,0032
ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ	0,0022	0,0148	0,0106
ΑΙΝΟΥ	0,0085	0,0043	0,0064
ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ	0,0127	0,0085	0,0106
ΜΟΥΡΙΚΗ	0,0022	0,0043	0,0064
3Η ΠΑΠΑΓΟΥ	0,0032	0,0169	0,0085
ΣΧΟΛΕΙΟ	0,0085	0,0043	0,0201
ΠΑΝΑΓΙΤΣΑ	0,0191	0,0032	0,0212

4.3 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το μαθηματικό μοντέλο του προβλήματος που διατυπώθηκε στην ενότητα 3.2, θα υλοποιηθεί στην πράξη στο λογισμικό «Evolver7», αφού πρώτα το μοντέλο υλοποιηθεί σε κώδικα στο περιβάλλον της «Visual Basic» στο λογισμικό «Excel».

4.3.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ EVOLVER

Το «Evolver7» είναι ένα λογισμικό το οποίο δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να βρίσκουν βέλτιστες λύσεις σε οποιοδήποτε είδος προβλήματος. Με πιο απλά λόγια, έχοντας ορίσει τα κατάλληλα δεδομένα εισόδου (inputs), μέσω του Evolver παράγονται και τα κατάλληλα δεδομένα εξόδου (outputs). Μερικές από τις δυνατότητες του λογισμικού, είναι η χρήση αυτού για την εύρεση του σωστού συνδυασμού, της σωστής σειράς ή και της σωστής ομαδοποίησης διαφόρων μεταβλητών οι οποίες παράγουν υψηλά κέρδη ή χαμηλά κόστη από τα ελάχιστα απαιτούμενα στοιχεία που εξαρτώνται.

Το Evolver χρησιμοποιεί το OptQuest, το οποίο πρόκειται για ένα εργαλείο βελτιστοποίησης και τους Γενετικούς Αλγορίθμους για να μπορέσει να βρει βέλτιστες λύσεις σε ένα πρόβλημα, καθώς αν το πρόβλημα είναι γραμμικό (linear) χρησιμοποιεί γραμμικές μεθόδους. Το εργαλείο OptQuest χρησιμοποιεί κυρίως μετά-ευρετικές μεθόδους και στοιχεία νευρωνικών δικτύων για να βρει τις βέλτιστες λύσεις σε προβλήματα απόφασης και προγραμματισμού όλων των ειδών. Ωστόσο το εργαλείο αυτό ενσωματώνει στις μεθόδους αυτές την Αναζήτηση Tabu, αλλά και γενικότερα τα νευρωνικά δίκτυα για την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Σε αντίθεση με την OptQuest, οι Γενετικοί Αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στο λογισμικό δίνουν τη βέλτιστη λύση στο μοντέλο που έχει κατασκευαστεί για την επίλυση του προβλήματος. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι, όπου θα γίνει ανάλυση σε επόμενο κεφάλαιο, ακολουθούν τη διαδικασία της βιολογικής εξέλιξης, δηλαδή δημιουργούν ένα περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται εκατοντάδες πιθανές λύσεις όπου οι λύσεις αυτές ‘ανταγωνίζονται’ μεταξύ τους και στο τέλος επικρατεί η καταλληλότερη – ικανότερη λύση. Έπειτα οι λύσεις αυτές κληρονομούν στους απογόνους τους τα καλύτερα γονίδια και μέσω αυτής της διαδικασίας παράγονται όλο ένα και περισσότερες καλύτερες λύσεις.

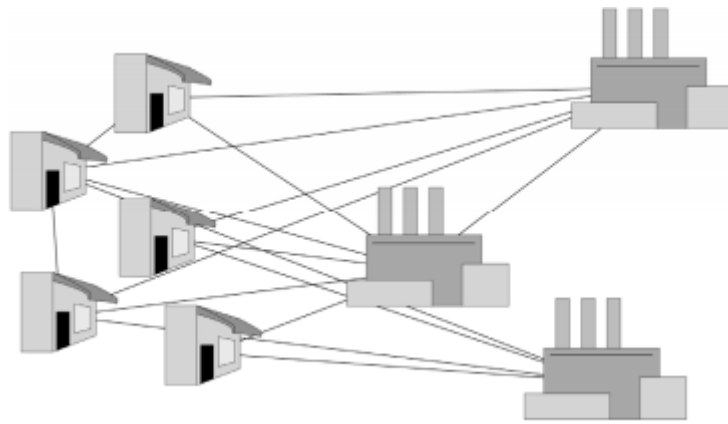
4.3.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Με τον όρο βελτιστοποίηση, όπως προαναφέρθηκε νοείται μία διαδικασία μέσω της οποίας μπορεί να βρεθεί η βέλτιστη καλύτερη λύση ενός προβλήματος, το οποίο περιλαμβάνει πολλές πιθανές λύσεις. Τα περισσότερα προβλήματα συνήθως περιλαμβάνουν πάρα πολλές μεταβλητές σχεδιασμού και πάρα πολλούς περιορισμούς, ο συνδυασμός των οποίων στοχεύει στη μεγιστοποίηση ή στην ελαχιστοποίηση (εξαρτάται από τον τύπο του προβλήματος) της αντικειμενικής συνάρτησης. Για να λυθούν τέτοιου είδους προβλήματα συνίσταται η χρήση αλγορίθμων οι οποίοι περιγράφουν βήμα προς βήμα τη διαδικασία με την οποία θα προσεγγιστεί το πρόβλημα. Τα προβλήματα που χαρακτηρίζονται από την επίλυση μέσω αλγορίθμου αποτελούνται από τρεις κύριες συνιστώσες:

Πίνακας 10: Συνιστώσες Προβλημάτων και Αντιστοιχία στο Evolver (Πηγή: Evolver The Genetic Algorithm Solver for Microsoft Excel, 2013, Palisade Corporation)

Συνιστώσες Προβλήματος	Δεδομένα Εισόδου	Αντικειμενική Συνάρτηση	Δεδομένα Εξόδου
Στο Evolver	Μεταβλητές Απόφασης	Μαθηματικό Μοντέλο	Στόχος

Για παράδειγμα έχουμε μία βιομηχανία με τρία εργοστάσια τα οποία παράγουν διάφορα αγαθά και τα αγαθά αυτά θα μεταφερθούν σε διάφορα καταστήματα. Το κάθε εργοστάσιο παράγει διαφορετικές ποσότητες αγαθών καθώς στο πρόβλημα συμπεριλαμβάνονται τα κόστη των υλικών από τα οποία αποτελούνται τα αγαθά αυτά. Επίσης, έχουμε τα κόστη μεταφορών των υλικών αυτών σε κάθε κατάσταση και τους διάφορους περιορισμούς των υλικών αυτών που αφορούν το κόστος. Ο σκοπός είναι να βρεθεί η βέλτιστη λύση όπου τα καταστήματα θα έχουν την απαιτούμενη ζήτηση από αγαθά με το ελάχιστο κόστος μεταφοράς αυτών στα καταστήματα. Σχηματικά το παράδειγμα απεικονίζεται παρακάτω, στο οποίο αναπαρίστανται όλες οι πιθανές λύσεις του προβλήματος που στοχεύουν στην κάλυψη της ζήτησης με το ελάχιστο κόστος.



Εικόνα 9: Σχηματική αναπαράσταση του προβλήματος μεταφοράς αγαθών με όλες τις πιθανές λύσεις (Πηγή: Evolver The Genetic Algorithm Solver for Microsoft Excel - Palisade Corporation, 2013)

Ωστόσο υπάρχουν και άλλων ειδών προβλήματα τα οποία δεν έχουν ως στόχο απαραίτητα την ελαχιστοποίηση μιας ποσότητας. Τέτοια προβλήματα είναι για παράδειγμα αυτά που στοχεύουν στην μεγιστοποίηση του κέρδους, καθώς υπάρχουν και προβλήματα που εστιάζουν στη μείωση της απόστασης μίας διαδρομής, όπως είναι για παράδειγμα το πρόβλημα που επιδιώκει να βρει τη βέλτιστη και συντομότερη απόσταση ανάμεσα στις πόλεις. Τέλος υπάρχει μία ειδική κατηγορία των προβλημάτων αυτών που αφορά τον προγραμματισμό, όπου στόχος είναι η μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας κατά τη διάρκεια μίας εργασίας.

4.3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, το Evolver χρησιμοποιεί δύο μεθόδους βελτιστοποίησης, τους Γενετικούς Αλγόριθμους και το εργαλείο βελτιστοποίησης OptQuest. Όμως πέρα από τις μεθόδους αυτές, παρέχεται και η δυνατότητα επίλυσης χρησιμοποιώντας διαφορετικές μεθόδους. Πιο συγκεκριμένα το λογισμικό περιέχει έξι τρόπους επίλυσης:

1. Επίλυση με τη μέθοδο **Budget**
2. Επίλυση με τη μέθοδο **Grouping**
3. Επίλυση με τη μέθοδο **Order**
4. Επίλυση με τη μέθοδο **Project**
5. Επίλυση με τη μέθοδο **Recipe**
6. Επίλυση με τη μέθοδο **Schedule**

Η επίλυση με τις μεθόδους Recipe, Order και Grouping χρησιμοποιούν διαφορετικούς αλγόριθμους, ενώ οι άλλες τρεις μέθοδοι προέρχονται ουσιαστικά από τις τρεις προηγούμενες με την προσθήκη μερικών περιορισμών ακόμη.

Στην παρούσα διπλωματική, η επίλυση θα γίνει με τη μέθοδο **Order**. Πρόκειται για μία δημοφιλή μέθοδο γενικότερα που χρησιμοποιείται σε πάρα πολλές περιπτώσεις, καθώς πρόκειται για την παραλλαγή που υφίστανται τα στοιχεία μίας λίστας στην οποία σκοπός είναι να βρεθεί ο καλύτερος τρόπος που θα προσεγγίζει τις τιμές που θα δίνονται. Η μέθοδος αυτή σε σχέση με άλλες δημοφιλείς μεθόδους (recipe, budget), αντί να αναπαράγει τιμές για τις μεταβλητές απόφασης μέσω του Evolver, χρησιμοποιεί ως αρχικές τιμές τις τιμές του μοντέλου. Πρόκειται για μία μέθοδο, που αναπαριστά τη σειρά με την οποία θα εκτελεστούν οι αντίστοιχες εργασίες. Παρ' όλα αυτά όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος, δεν υπάρχει εύρος ελάχιστης – μέγιστης τιμής στα ρυθμιζόμενα κελιά (adjustable cells) διότι το λογισμικό χρησιμοποιεί τις τιμές (ως αρχικές) που υπάρχουν στο φύλλο του Excel όπου γίνεται η βελτιστοποίηση. Στην επόμενη ενότητα θα γίνει μία εκτενής αναφορά στους Γενετικούς Αλγόριθμους.

4.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν όσον αφορά τη βελτιστοποίηση είναι ο πληθυσμός, η διασταύρωση και η μετάλλαξη. Οι τιμές που επιλέχθηκαν για τις παραμέτρους αυτές είναι 25, 50, 75 για τον πληθυσμό, 0.2, 0.6, 0.8 για τη διασταύρωση και 0.05, 0.15, 0.25 για τη μετάλλαξη. Ο λόγος που επιλέχθηκαν τόσες πολλές τιμές για κάθε παράμετρο είναι για να δούμε κατά πόσο αλλάζουν τα αποτελέσματα ως προς κάθε συνδυασμό. Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, επιδιώκεται να έχουμε μικρές τιμές ως προς τη μετάλλαξη (< 0.5) έτσι ώστε ο αλγόριθμος να αποφεύγεται να βρίσκεται συνέχεια σε τυχαίο ψάξιμο. Επίσης, για τον πληθυσμό δεν είναι επιθυμητό να έχουμε μεγάλες τιμές γιατί ο αλγόριθμος δεν θα δίνει λύσεις σε σύντομα χρονικά διαστήματα. Τέλος, όσον αφορά τη διασταύρωση προτιμάται μικρό βήμα για να μπορέσει ο αλγόριθμος να συγκλίνει πιο γρήγορα.

Πραγματοποιήθηκαν όλοι οι συνδυασμοί για τις παραπάνω τιμές και για κάθε έναν συνδυασμό εκτελέστηκε ο αλγόριθμος 5 φορές, έτσι ώστε να μπορούν να συγκριθούν

τα αποτελέσματα που προκύπτουν για κάθε συνδυασμό ξεχωριστά και κατά πόσο συγκλίνουν ή αποκλίνουν μεταξύ τους. Επομένως η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε συνολικά 135 φορές. Η διάρκεια αυτών ήταν 20 λεπτά και αυτό γιατί με βάση κάποιων δοκιμών που έγιναν, διαπιστώθηκε ότι δεν παρατηρούνται αλλαγές ως προς τη βέλτιστη λύση μετά από τα 16 με 17 λεπτά. Η βελτιστοποίηση εκτελέστηκε σε φορητό υπολογιστή με 8.00 GB RAM και επεξεργαστή Intel Core i5-8250U στα 1.60 GHz.

4.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

4.5.1 ΑΡΧΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ (VISUAL BASIC)

Αρχικά, έγινε μία εκτίμηση των αποτελεσμάτων στη Visual Basic σύμφωνα με τον αλγόριθμο που υλοποιήθηκε στο περιβάλλον της γλώσσας αυτής. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν απεικονίζονται παρακάτω:

Πίνακας 2: Αρχική Εκτίμηση Αποτελεσμάτων του Αλγορίθμου στη Visual Basic

Σταθμός Μετρό	Κόμβοι (Διαδοχική Ακολουθία)	Λεωφορεία	Διαδρομές	Κόστος
Μετρό Δάφνης	2	1	1	40,0988884
	15	2	1	
	5	2	2	
	10	3	2	
	13	3	3	
	12	3	3	
	3	4	3	
	8	4	4	
	7	5	4	
	9	5	5	
	1	5	5	
	14	6	5	
	11	6	6	
	4	7	6	
	6	7	7	
	15	1	1	

Μετρό Αγ. Ιωάννης	8	1	1	43,58377838
	9	2	1	
	7	2	2	
	1	3	2	
	6	4	3	
	3	4	4	
	10	5	4	
	2	5	5	
	11	5	5	
	4	6	5	
	14	6	6	
	12	6	6	
	13	7	7	
	5	9	8	
Μετρό Αγ. Δημήτριος	15	2	1	103,1741638
	5	2	2	
	10	2	2	
	6	3	2	
	4	4	3	
	7	6	4	
	11	6	5	
	9	7	5	
	2	7	6	
	1	8	6	
	3	9	7	
	13	10	8	
	14	11	9	
	8	11	10	
12	11	10		
<u>Συνολικό Κόστος</u>				186,8568306

Όπως φαίνεται και παραπάνω, για τις διαδρομές που θα καταλήγουν στο σταθμό μετρό Δάφνη χρειάζονται συνολικά 7 αυτόνομα λεωφορεία χωρητικότητας 15 ατόμων το καθένα. Αντίστοιχα για τις διαδρομές προς τους σταθμούς Άγιος Ιωάννης και Άγιος Δημήτριος χρειάζονται συνολικά 8 και 11 αυτόνομα λεωφορεία. Όσον αφορά τα κόστη έχουμε για στο σταθμό Δάφνη 40.10 περίπου, για το σταθμό Αγ. Ιωάννη 43.58 και για το σταθμό Αγ. Δημήτριο 103.17 έχοντας συνολικό κόστος 186.86.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι διάρκειες των διαδρομών που προέκυψαν από την αρχική εκτίμηση για κάθε έναν σταθμό ξεχωριστά:

Πίνακας 3: Αρχική Εκτίμηση των Διαρκειών των Διαδρομών για κάθε σταθμό στη Visual Basic

Σταθμός Μετρό	Διαδρομή	Διάρκειες Διαδρομών (h)
Μετρό Δάφνη	1	0,45
	2	0,46
	3	0,51
	4	0,42
	5	0,47
	6	0,45
	7	0,34
Μετρό Αγ. Ιωάννης	1	0,47
	2	0,48
	3	0,40
	4	0,46
	5	0,55
	6	0,44
	7	0,39
	8	0,39

Μετρό Αγ. Δημήτριος	1	0,40
	2	0,52
	3	0,42
	4	0,42
	5	0,44
	6	0,44
	7	0,39
	8	0,38
	9	0,36
	10	0,40

4.5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ (EVOLVER)

Ύστερα έγινε η βελτιστοποίηση μέσω του λογισμικού Evolver, για τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω και πραγματοποιήθηκαν συνολικά 135 συνδυασμοί οι οποίοι απεικονίζονται παρακάτω με τα αποτελέσματα που έβγαλε ο κάθε συνδυασμός:

Πίνακας 4: Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης για όλους τους συνδυασμούς

Population	Crossover	Mutation	Trials	Totalcost	Object_Function_1	Object_Function_2	Object_Function_3	Routes	Time to Find Best	Average Totalcost
25	0,2	0,05	116609	70,47183228	16,08055496	14,92211151	39,4691658	7,9,11	17:24	73,5583004
			104120	79,08016777	20,11055565	16,57877731	42,39083481	7,8,11	10:58	
			102553	73,18183517	19,03888893	15,60711098	38,53583527	7,8,11	10:49	
			104941	72,97083378	17,93955612	14,57877827	40,45249939	7,8,11	18:46	
			103570	72,086833	18,07388878	15,5421114	38,47083282	7,8,11	14:16	
25	0,2	0,15	126836	69,31183338	16,02722168	14,88211155	38,40250015	7,9,11	19:21	74,41350021
			107325	77,09683514	20,04055595	14,50544453	42,55083466	7,8,11	19:36	
			105135	75,06516743	16,10888863	15,56877804	43,38750076	7,8,11	16:46	
			105339	75,19849968	16,1072216	16,56711197	42,52416611	7,8,11	15:25	
			106908	75,39516544	16,15555573	14,82544422	44,4141655	7,9,11	19:59	
25	0,2	0,25	125612	80,41183472	20,00722313	16,91377831	43,49083328	7,9,11	7:41	87,22850189

			50187	90,63516998	23,13222313	18,93377876	48,56916809	7,9,11	10:39	
			51311	92,8085022	20,1222229	18,56711197	54,11916733	7,8,10	17:27	
			52426	87,12350273	22,06555557	22,55877876	42,4991684	7,8,11	14:16	
			51234	85,16349983	21,07722282	16,59544373	47,49083328	7,8,11	13:15	
25	0,6	0,05	120269	72,45350075	18,08222198	15,87544441	38,49583435	7,9,11	13:25	
			51295	73,08016586	18,03888893	15,52044487	39,52083206	7,8,11	18:06	
			51470	76,07349968	21,04222298	14,54544449	40,48583221	7,8,11	9:55	74,33883362
			47973	74,20350075	20,11388969	15,61544418	38,47416687	7,8,11	14:53	
			74440	75,88350105	15,88722229	16,55044365	43,44583511	7,8,11	17:40	
25	0,6	0,15	118825	70,45183468	16,04555511	15,88877773	38,51750183	7,9,11	19:06	
			88477	78,19516945	18,08388901	16,59377861	43,51750183	7,8,11	18:54	
			93301	74,11183167	20,12388802	15,53544426	38,45249939	7,8,11	16:28	74,77363377
			101042	73,06750107	18,02955627	16,56044388	38,47750092	7,8,11	11:50	
			103633	78,04183197	17,04555511	16,54877853	44,44749832	7,8,11	17:25	
25	0,6	0,25	117796	82,32683182	16,04888916	20,86377716	45,4141655	7,9,11	9:52	
			109939	81,17850113	25,12388992	16,63877869	39,41583252	7,8,11	16:32	
			109798	87,04183578	23,00388908	17,57377815	46,46416855	7,8,11	15:36	84,37116737
			99161	87,19683456	28,15555573	16,49377823	42,54750061	7,8,11	10:34	
			110924	84,11183357	16,04555511	19,60377693	48,46250153	7,8,11	8:34	
25	0,8	0,05	113548	69,23849869	16,1538887	14,59877777	38,48583221	7,8,11	15:30	
			96961	70,06850147	16,04388809	15,52377796	38,50083542	7,8,11	14:29	
			101497	72,01850319	16,04222298	17,49377823	38,48250198	7,8,11	16:53	71,57816715
			113502	73,05349827	16,04388809	14,57711124	42,43249893	7,8,11	17:48	
			96166	73,51183414	17,05722237	14,98044491	41,47416687	7,9,11	10:24	
25	0,8	0,15	114547	69,96850109	17,00055504	14,52377796	38,44416809	7,8,11	19:22	
			104769	73,92849922	16,94722176	14,51044464	42,47083282	7,8,11	16:31	
			92824	70,02350044	15,98222256	15,60211086	38,43916702	7,8,11	16:37	72,02283344
			114016	72,13850021	18,04888916	15,54544449	38,54416656	7,8,11	17:45	
			109651	74,05516624	15,99388885	15,608778	42,45249939	7,8,11	17:06	
25	0,8	0,25	118535	81,94516563	22,03555489	15,54377747	44,36583328	7,8,11	18:57	
			100862	80,27516747	21,17222214	16,59377861	42,50916672	7,8,11	14:37	
			46149	83,07350159	17,01388931	17,5854454	48,47416687	7,8,11	13:10	84,05763359
			42928	86,05183411	23,06555557	17,56544495	45,42083359	7,8,11	6:55	
			46770	88,94249916	18,02788925	19,48044395	51,43416595	7,8,11	16:59	
50	0,2	0,05	51760	73,05516624	16,00055504	15,58044434	41,47416687	7,8,11	15:10	
			47148	74,13016605	16,04722214	15,59544468	42,48749924	7,8,11	10:57	75,1051672
			46591	81,09350204	18,01222229	20,5854454	42,49583435	7,8,11	12:44	

			93279	73,06183434	17,97722244	15,62711143	39,45750046	7,8,11	16:20	
			113198	74,18516731	19,05722237	16,58377838	38,54416656	7,8,11	19:57	
50	0,2	0,15	110582	76,05183411	18,03055573	17,54377747	40,47750092	7,8,11	16:13	76,07416725
			50375	77,13349915	19,04222298	19,56877708	38,52249908	7,8,11	18:50	
			49446	75,15016937	18,09388924	16,50377846	40,55250168	7,8,11	14:05	
			108804	78,10350227	19,04222298	17,58211136	41,47916794	7,8,11	14:29	
			108746	73,93183136	17,95722198	15,54377747	40,43083191	7,8,11	16:41	
50	0,2	0,25	115936	84,04683304	18,99388885	23,56377792	41,48916626	7,8,11	7:44	87,84416771
			113554	84,16683578	21,16555595	17,50044441	45,50083542	7,8,11	11:48	
			50448	94,92016792	19,03222275	16,49877739	59,38916779	7,8,11	19:18	
			48902	82,24183464	23,1222229	16,56877708	42,55083466	7,8,11	14:51	
			49157	93,84516716	21,15222168	19,55377769	53,13916779	7,8,10	9:09	
50	0,6	0,05	114664	74,19350052	16,11888885	19,5854454	38,48916626	7,8,11	17:10	77,99516773
			48242	80,01183414	20,07888985	14,55211163	45,38083267	7,8,11	18:12	
			37602	84,13183594	20,1222229	16,54544449	47,46416855	7,8,11	7:05	
			105519	73,16683388	16,02388954	17,63877869	39,50416565	7,8,11	15:51	
			105313	78,47183418	22,00055504	17,9371109	38,53416824	7,9,11	15:01	
50	0,6	0,15	114817	75,22183418	17,93555641	17,83044434	39,45583344	7,9,11	16:38	75,27316666
			106308	76,03683281	17,07055473	16,50877762	42,45750046	7,8,11	18:49	
			107000	76,05516624	17,03055573	16,59211159	42,43249893	7,8,11	15:51	
			106051	73,13016701	18,07388878	15,54711151	39,50916672	7,8,11	3:26	
			113010	75,92183304	17,95388985	15,53711128	42,43083191	7,8,11	18:41	
50	0,6	0,25	115635	85,16849899	27,1538887	17,52544403	40,48916626	7,8,11	13:39	87,62816658
			114811	86,25349808	22,17222214	18,56044388	45,52083206	7,8,11	14:54	
			115820	93,71850204	21,05055618	17,54544449	55,12250137	7,8,10	11:48	
			106468	84,80016708	21,04388809	16,59711075	47,15916824	7,8,10	18:59	
			51293	88,2001667	24,05555534	17,56377792	46,58083344	7,8,11	11:43	
50	0,8	0,05	113795	72,48016834	17,00055504	15,87211132	39,60750198	7,9,11	17:41	74,94050045
			53326	75,00850105	18,0988884	15,49877739	41,41083527	7,8,11	18:38	
			42039	76,08183289	19,03055573	18,49044418	38,56083298	7,8,11	14:14	
			55365	73,11350155	16,13222313	15,52211094	41,45916748	7,8,11	18:34	
			54735	78,01849842	18,96722221	14,53044415	44,52083206	7,8,11	18:43	
50	0,8	0,15	116803	74,03683186	17,99055481	14,5421114	41,50416565	7,8,11	14:40	74,65983334
			77111	75,15849876	17,16388893	17,45711136	40,53749847	7,8,11	18:22	
			102188	72,98350143	20,04888916	14,54544449	38,38916779	7,8,11	12:56	
			104164	75,13516617	18,11722183	14,54711151	42,47083282	7,8,11	15:49	
			105444	75,98516846	15,99388885	16,54711151	43,44416809	7,8,11	18:10	

50	0,8	0,25	118143	84,18083382	20,12122154	17,56544495	46,49416733	7,8,11	13:49	82,64796715
			107467	79,0751667	18,0205555	18,51377869	42,54083252	7,8,11	6:17	
			106665	82,00016403	20,9822216	19,56877708	41,44916534	7,8,11	14:13	
			109769	86,08183479	20,05055618	20,51711082	45,51416779	7,8,11	13:17	
			107462	81,9018364	20,96222305	20,45877838	40,48083496	7,8,11	16:02	
75	0,2	0,05	116166	74,08849907	17,05888939	18,5621109	38,46749878	7,8,11	19:20	76,71496716
			117712	78,08350182	19,09388924	16,52544403	42,46416855	7,8,11	16:25	
			111891	77,12683201	20,03555489	14,58544445	42,50583267	7,8,11	18:25	
			111739	78,06083488	18,99455643	17,55711174	41,50916672	7,8,11	19:29	
			99149	76,215168	17,03555489	20,62544441	38,5541687	7,8,11	12:37	
75	0,2	0,15	114801	73,090168	19,00388908	14,55377769	39,53250122	7,8,11	13:01	76,90016689
			102674	74,99683475	17,01222229	15,52544498	42,45916748	7,8,11	14:43	
			93250	83,11849976	19,06222153	17,56044388	46,49583435	7,8,11	18:44	
			98915	77,15683365	18,12388992	16,54711151	42,48583221	7,8,11	18:20	
			88627	76,13849831	16,09222221	16,5621109	43,48416519	7,8,11	13:42	
75	0,2	0,25	107874	88,1518364	18,09555626	16,55877876	53,49750137	7,8,11	9:00	86,94816666
			85128	88,18349838	20,16555595	16,53377724	51,48416519	7,8,11	6:46	
			104201	84,14850044	21,09555626	18,58211136	44,47083282	7,8,11	18:42	
			104934	91,11349869	22,0288887	19,56044388	49,52416611	7,8,11	17:17	
			104398	83,14349937	19,05722237	22,54711151	41,5391655	7,8,11	10:50	
75	0,6	0,05	106078	79,17683411	19,05722237	17,55711174	42,5625	7,8,11	16:00	77,53516731
			95574	78,14683533	19,10555649	16,58211136	42,45916748	7,8,11	7:54	
			96075	73,06849957	18,06222153	15,53044415	39,47583389	7,8,11	12:56	
			103018	78,06016731	18,02722168	17,5154438	42,51750183	7,8,11	18:30	
			103391	79,22350025	19,18222237	15,51377773	44,52750015	7,8,11	8:59	
75	0,6	0,15	45680	82,25016594	20,16222191	20,59544373	41,49250031	7,8,11	19:32	79,29283428
			90623	78,1918354	19,10388947	20,53377724	38,5541687	7,8,11	7:38	
			92287	71,07016563	16,03888893	16,56377792	38,46749878	7,8,11	19:46	
			48910	79,88016891	19,99388885	16,5304451	43,35583496	7,8,11	12:09	
			47523	85,07183552	20,13055611	15,5504446	49,39083481	7,8,11	15:44	
75	0,6	0,25	46893	95,71850014	18,02222252	23,58377838	54,11249924	7,8,10	19:27	93,16916752
			45722	95,15350151	21,02388954	26,56711197	47,5625	7,8,11	8:37	
			46041	90,68183613	21,06888962	14,56044483	55,05250168	7,8,10	15:15	
			46210	94,1068325	19,12555504	21,54711151	53,43416595	7,8,11	5:40	
			39424	90,18516731	20,06388855	17,57044411	52,55083466	7,8,11	18:20	
75	0,8	0,05	84084	77,07850075	17,01388931	17,53544426	42,52916718	7,8,11	19:05	75,78949947
			74056	78,51683426	18,04222298	17,93211174	42,54249954	7,9,11	19:35	

			95534	75,95516586	19,95888901	17,56377792	38,43249893	7,8,11	19:19	
			100183	72,30016422	17,14222145	15,60211086	39,55583191	7,8,11	18:07	
			99869	75,09683228	17,04055595	17,53544426	40,52083206	7,8,11	15:38	
75	0,8	0,15	43112	74,09850121	17,03055573	17,55711174	39,51083374	7,8,11	14:01	73,31183414
			98751	75,11683464	17,03888893	14,58211136	43,49583435	7,8,11	10:35	
			98960	74,01683235	20,03388977	15,51711082	38,46583176	7,8,11	8:40	
			99495	71,09183502	18,01888847	14,53711128	38,53583527	7,8,11	12:45	
			100412	72,2351675	17,15055656	14,59377766	40,49083328	7,8,11	17:16	
75	0,8	0,25	98648	86,08016396	21,97222137	18,58711052	45,52083206	7,8,11	14:35	81,50016632
			99686	86,03183556	18,0755558	25,51377869	42,44250107	7,8,11	9:36	
			99422	78,14183235	17,12055588	18,55377769	42,46749878	7,8,11	19:00	
			99816	79,07016563	17,04555511	18,55877876	43,46583176	7,8,11	18:32	
			98930	78,17683411	18,00388908	18,58877754	41,58416748	7,8,11	15:19	

4.5.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΛΥΣΗΣ

Όπως φαίνεται και παραπάνω, ο συνδυασμός που δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα, δηλαδή το ελάχιστο κόστος είναι ο συνδυασμός με:

- Πληθυσμό: 25
- Συντελεστή Διασταύρωσης: 0.8
- Συντελεστή Μετάλλαξης: 0.05

Πιο συγκεκριμένα το κόστος που έδωσε ο συνδυασμός αυτός είναι **71,58**. Παρακάτω παρουσιάζονται οι διαδρομές που προέκυψαν, η διαδοχική ακολουθία των στάσεων και τα αυτόνομα λεωφορεία που χρειάστηκαν για να εξυπηρετήσουν πλήρως τη ζήτηση:

Πίνακας 5: Αποτελέσματα Βέλτιστης Λύσης (Evolver)

Σταθμός Μετρό	Κόμβοι (Διαδοχική Ακολουθία)	Λεωφορεία	Διαδρομές	Κόστος
Μετρό Δάφνης	7	2	1	16,04388809
	8	2	2	
	5	2	2	
	15	3	3	
	6	3	4	

	9	3	4	
	3	3	4	
	13	4	5	
	2	4	5	
	11	4	5	
	14	5	6	
	12	5	6	
	10	5	6	
	4	6	7	
	1	6	7	
	10	1	1	
	6	1	1	
	13	2	2	
	11	2	3	
	2	2	3	
	14	2	3	
	12	2	3	
	8	2	3	
	7	3	4	
	3	4	4	
	4	4	5	
	15	5	6	
	9	5	6	
	1	6	7	
	5	7	8	
	6	1	1	
	15	2	2	
	13	2	3	
	10	3	3	
	4	3	4	
	3	4	5	
	2	4	6	
Μετρό Αγ. Ιωάννης				15,52377796
Μετρό Αγ. Δημήτριος				38,50083542

	5	4	6	
	12	4	6	
	14	5	7	
	1	6	8	
	9	6	9	
	7	7	10	
	8	7	11	
	11	7	11	
<u>Συνολικό Κόστος</u>				70,06850147

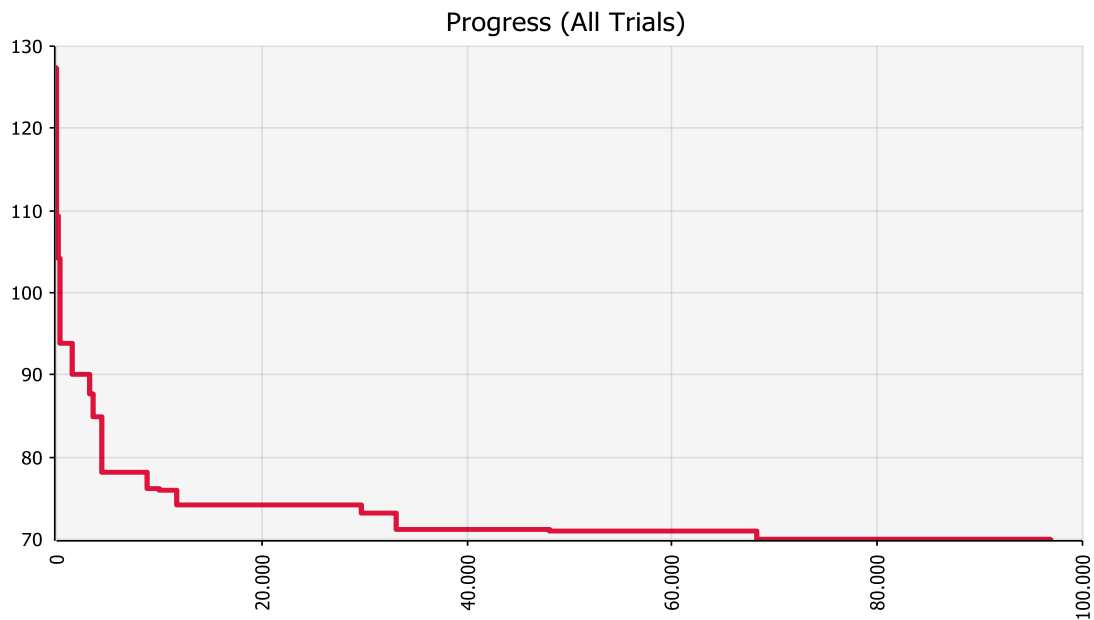
Παρακάτω παρουσιάζονται οι διάρκειες των διαδρομών της βέλτιστης λύσης που προέκυψαν:

Πίνακας 6: Διάρκειες Διαδρομών Βέλτιστης Λύσης (Evolner)

Σταθμός Μετρό	Διαδρομή	Διάρκειες Διαδρομών (h)
Μετρό Δάφνη	1	0,39
	2	0,41
	3	0,42
	4	0,46
	5	0,47
	6	0,45
	7	0,44
Μετρό Αγ. Ιωάννης	1	0,44
	2	0,39
	3	0,58
	4	0,45
	5	0,42
	6	0,47
	7	0,39
	8	0,39

Μετρό Αγ. Δημήτριος	1	0,40
	2	0,39
	3	0,48
	4	0,42
	5	0,42
	6	0,48
	7	0,38
	8	0,39
	9	0,38
	10	0,36
	11	0,39

Παρακάτω απεικονίζεται το διάγραμμα των δοκιμών που πραγματοποιήσε ο αλγόριθμος (96961 δοκιμές συνολικά) ως προς το βέλτιστο κόστος που βρήκε:



Εικόνα 14: Διάγραμμα των Δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν ως προς το Συνολικό Κόστος

Τέλος, απεικονίζονται οι διαδρομές στην περιοχή μελέτης με την αντίστοιχη αλληλουχία των στάσεων:










Εικόνα 10: Διαδρομές Λεωφορείων προς Μετρό Δάφνη











Εικόνα 11: Διαδρομές Λεωφορείων προς Μετρό Άγιο Ιωάννη






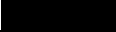


Πίνακας 7: Υπόμνημα Διαδρομών προς Μετρό Δάφνη

Υπόμνημα		
Διαδρομή	Χρώμα	Αλληλουχία Στάσεων
1		ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ → ΜΕΤΡΟ ΔΑΦΝΗ
2		ΙΑΣΩΝΟΣ → ΛΟΥΤΡΑ → ΜΕΤΡΟ ΔΑΦΝΗ
3		ΠΑΝΑΓΙΤΣΑ → ΜΕΤΡΟ ΔΑΦΝΗ
4		10 ^Η ΑΡΤΑΚΗΣ → ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ → 8 ^Η ΑΡΤΑΚΗΣ → ΜΕΤΡΟ ΔΑΦΝΗ
5		3 ^Η ΠΑΠΑΓΟΥ → 6 ^Η ΑΙΓΑΙΟΥ → ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ → ΜΕΤΡΟ ΔΑΦΝΗ
6		ΣΧΟΛΕΙΟ → ΜΥΤΙΚΗ → ΑΙΝΟΥ → ΜΕΤΡΟ ΔΑΦΝΗ
7		ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ → ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ → ΜΕΤΡΟ ΔΑΦΝΗ

Πίνακας 8: Υπόμνημα Διαδρομών προς Μετρό Άγιο Ιωάννη

Υπόμνημα		
Διαδρομή	Χρώμα	Αλληλουχία Στάσεων
1		ΑΙΝΟΥ → 10 ^Η ΑΡΤΑΚΗΣ → ΜΕΤΡΟ ΑΓ. ΙΩΑΝΝΗΣ
2		3 ^Η ΠΑΠΑΓΟΥ → ΜΕΤΡΟ ΑΓ. ΙΩΑΝΝΗΣ
3		ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ → 6 ^Η ΑΙΓΑΙΟΥ → ΣΧΟΛΕΙΟ → ΜΟΥΡΙΚΗ → ΙΑΣΩΝΟΣ → ΜΕΤΡΟ ΑΓ. ΙΩΑΝΝΗΣ
4		ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ → 8 ^Η ΑΡΤΑΚΗΣ → ΜΕΤΡΟ ΑΓ. ΙΩΑΝΝΗΣ
5		ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ → ΜΕΤΡΟ ΑΓ. ΙΩΑΝΝΗΣ
6		ΠΑΝΑΓΙΤΣΑ → ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ → ΜΕΤΡΟ ΑΓ. ΙΩΑΝΝΗΣ
7		ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ → ΜΕΤΡΟ ΑΓ. ΙΩΑΝΝΗΣ
8		ΛΟΥΤΡΑ → ΜΕΤΡΟ ΑΓ.ΙΩΑΝΝΗΣ

Πίνακας 9: Υπόμνημα Διαδρομών προς Μετρό Άγιο Δημήτριο

Υπόμνημα		
Διαδρομή	Χρώμα	Αλληλουχία Στάσεων
1		10 ^Η ΑΡΤΑΚΗΣ → ΜΕΤΡΟ ΑΓ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
2		ΠΑΝΑΓΙΤΣΑ → ΜΕΤΡΟ ΑΓ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
3		3 ^Η ΠΑΠΑΓΟΥ → ΑΙΝΟΥ → ΜΕΤΡΟ ΑΓ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
4		ΑΓΙΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ → ΜΕΤΡΟ ΑΓ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
5		8 ^Η ΑΡΤΑΚΗΣ → ΜΕΤΡΟ ΑΓ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
6		6 ^Η ΑΙΓΑΙΟΥ → ΛΟΥΤΡΑ → ΜΟΥΡΙΚΗ → ΜΕΤΡΟ ΑΓ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
7		ΣΧΟΛΕΙΟ → ΜΕΤΡΟ ΑΓ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
8		ΓΥΜΝΑΣΤΗΡΙΟ → ΜΕΤΡΟ ΑΓ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
9		ΑΡΣΑΚΕΙΟΥ → ΜΕΤΡΟ ΑΓ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
10		ΔΡΑΓΑΤΣΑΝΙΟΥ → ΜΕΤΡΟ ΑΓ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
11		ΙΑΣΩΝΟΣ → ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΟ → ΜΕΤΡΟ ΑΓ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Όσον αφορά το στόλο των αυτόνομων λεωφορείων απεικονίζεται παρακάτω ο αριθμός των αυτόνομων λεωφορείων που χρειάζονται για να εξυπηρετήσουν πλήρως τη ζήτηση, για κάθε σταθμό ξεχωριστά:

Πίνακας 10: Στόλος Αυτόνομων Λεωφορείων προς κάθε Σταθμό Μετρό

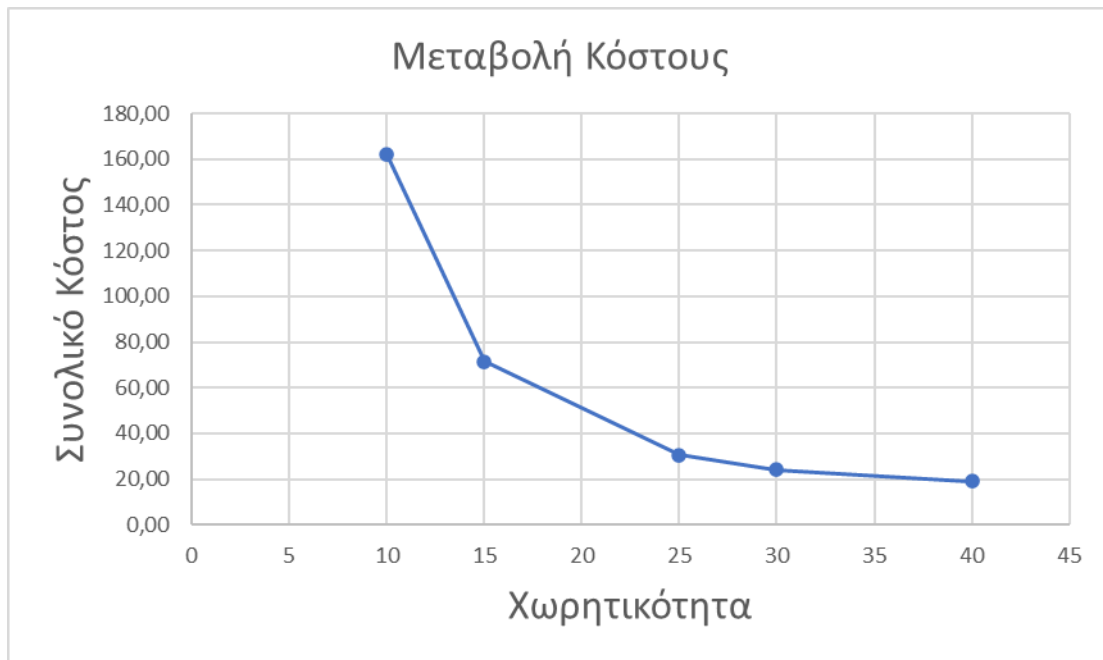
Σταθμός	Στόλος Αυτόνομων Λεωφορείων
Μετρό Δάφνη	6
Μετρό Αγ. Ιωάννης	7
Μετρό Αγ. Δημήτριος	7
Σύνολο	20

4.6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

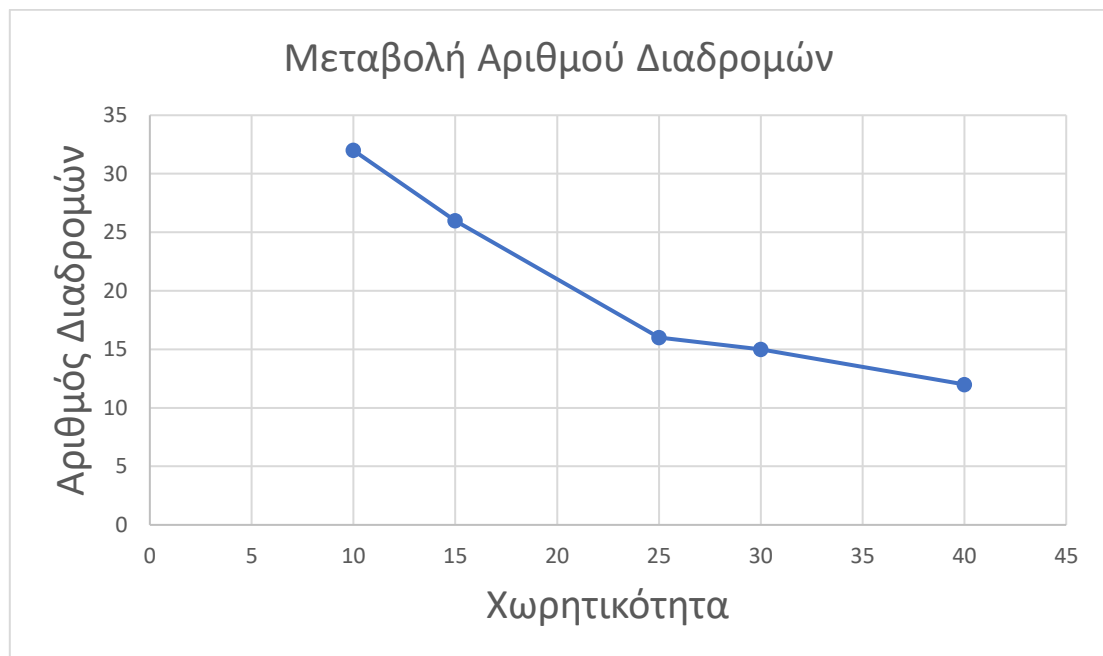
Σε αυτή την ενότητα θα πραγματοποιηθεί μία ανάλυση ευαισθησίας ως προς τις τιμές των παραμέτρων της βέλτιστης λύσης του προβλήματος. Οι παράμετροι αυτοί είναι η χωρητικότητα και η ζήτηση, των οποίων θα αλλάξουν οι τιμές έτσι ώστε να δούμε ποια είναι η διαφορά στα αποτελέσματα με αυτά της βέλτιστης λύσης.

i) Χωρητικότητα Αυτόνομων Λεωφορείων

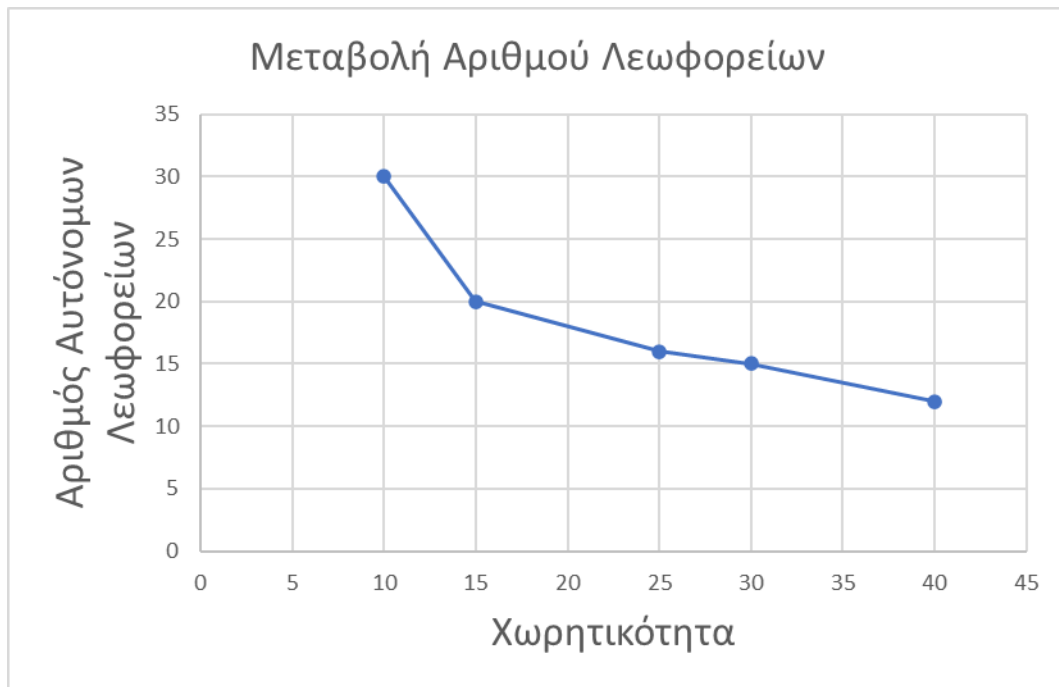
Η χωρητικότητα σε αυτή την περίπτωση αυξήθηκε από 15 σε 25 και όπως ήταν αναμενόμενο, οι διαδρομές μειώθηκαν προς κάθε σταθμό ξεχωριστά καθώς επίσης και τα λεωφορεία που εξυπηρετούν πλήρως τη ζήτηση είναι λιγότερα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική και μεγάλη μείωση του κόστους από **71.58** σε **30.65**. Και αυτό είναι λογικό από τη στιγμή που μειώθηκαν οι συνολικές διαδρομές προς κάθε σταθμό ξεχωριστά διότι χρειάστηκαν λιγότερα λεωφορεία για να εξυπηρετήσουν την ίδια ζήτηση (ίδια με της βέλτιστης λύσης), επομένως είναι αναμενόμενο να έχουμε μείωση της αντικειμενικής συνάρτησης. Γενικότερα όμως, στην περίπτωση που η χωρητικότητα των λεωφορείων μειωνόταν θα είχαμε αύξηση των διαδρομών, αύξηση των λεωφορείων και συνεπώς αύξηση του συνολικού κόστους. Παρακάτω παρουσιάζεται η μεταβολή του κόστους, των αριθμών των διαδρομών και των αριθμών των αυτόνομων λεωφορείων για διάφορες τιμές της χωρητικότητας.



Εικόνα 13: Μεταβολή Συνολικού Κόστους ως προς τη Χωρητικότητα



Εικόνα 14: Μεταβολή Αριθμού Διαδρομών ως προς τη Χωρητικότητα

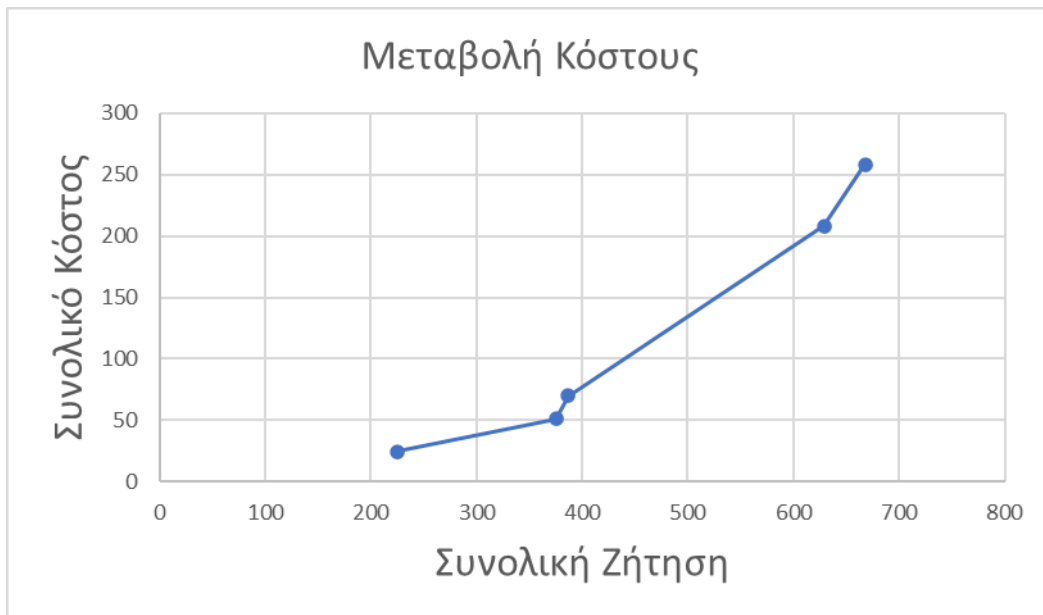


Εικόνα 15: Μεταβολή Αριθμού Αυτόνομων Λεωφορείων ως προς τη Χωρητικότητα

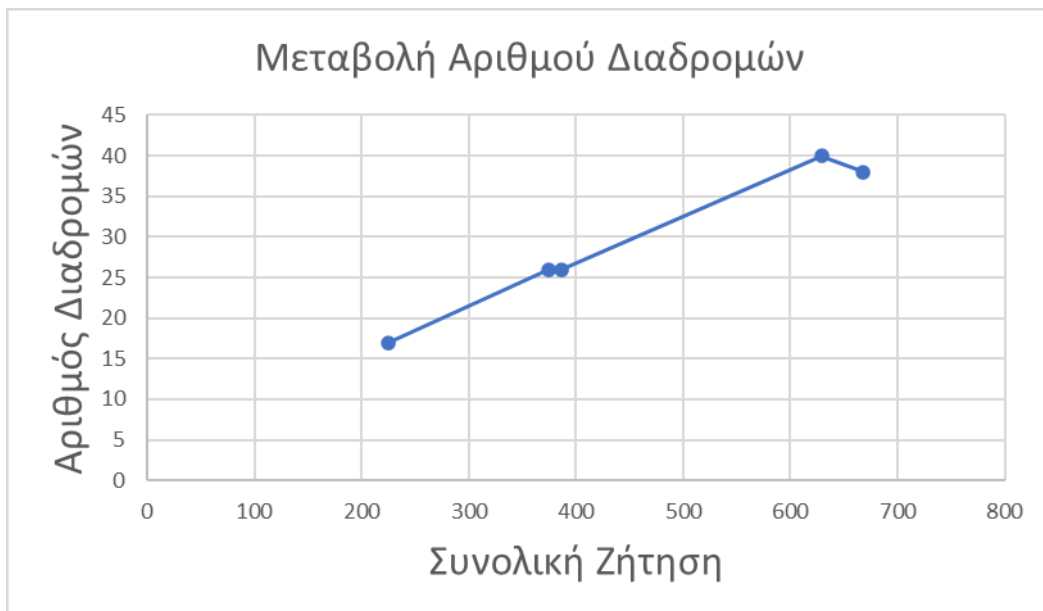
ii) Ζήτηση Αυτόνομων Λεωφορείων

Η δεύτερη παράμετρος για την οποία θα γίνουν διάφορες δοκιμές είναι η ζήτηση που θα εξυπηρετούν τα λεωφορεία. Και σε αυτή την περίπτωση θα γίνουν δοκιμές και για αύξηση του ορίου της ζήτησης και για μείωση αυτού με σταθερή χωρητικότητα (με αυτή της βέλτιστης λύσης). Όπως ήταν αναμενόμενο και σε αυτή την περίπτωση, για αύξηση της ζήτησης, θα έχουμε αύξηση των διαδρομών και των λεωφορείων που θα εξυπηρετούν τη ζήτηση καθώς και αύξηση του συνολικού κόστους. Σε αντίθετη περίπτωση για μείωση της ζήτησης, θα υπάρξει μείωση των διαδρομών καθώς και του κόστους και του αριθμού των λεωφορείων, διότι λιγότερη ζήτηση θα καλύπτεται από λιγότερες διαδρομές και λιγότερα λεωφορεία. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις, όπως φαίνεται και στο τρίτο διάγραμμα, που μπορεί στη μία περίπτωση να χρειάζονται περισσότερες διαδρομές με λιγότερα λεωφορεία, για να καλυφθεί η ζήτηση και σε άλλη περίπτωση με την ίδια ζήτηση να χρειάζονται λιγότερες διαδρομές και περισσότερα λεωφορεία.

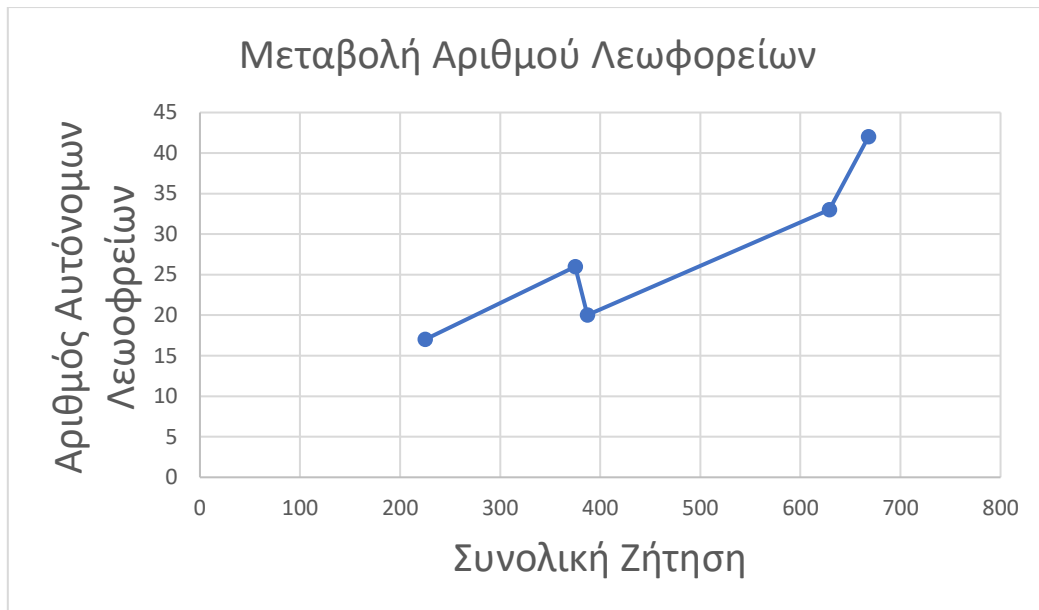
Παρακάτω παρουσιάζεται η μεταβολή του κόστους, των αριθμών των διαδρομών και των αριθμών των αυτόνομων λεωφορείων για διάφορες τιμές της ζήτησης.



Εικόνα 16: Μεταβολή Συνολικού Κόστους ως προς τη Συνολική Ζήτηση



Εικόνα 17: Μεταβολή Αριθμού Διαδρομών ως προς τη Συνολική Ζήτηση



Εικόνα 18: Μεταβολή Αριθμού Αυτόνομων Λεωφορείων ως προς τη Συνολική Ζήτηση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μία σύνοψη της μελέτης που πραγματοποιήθηκε και θα σχολιαστούν τα συμπεράσματα αυτής. Τέλος, θα προταθούν διάφοροι άλλοι παράγοντες τους οποίους μπορεί να λάβει κανείς υπόψη για να μελετήσει το θέμα μελλοντικά.

5.2 ΣΥΝΟΨΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αρχικά πραγματοποιήθηκε μία εισαγωγή σχετικά με το ρόλο των αστικών συγκοινωνιών στον αστικό χώρο και έγινε μία αναφορά στα αυτόνομα λεωφορεία, τις θετικές και αρνητικές επιπτώσεις αυτών στο σύστημα μεταφορών, και το ρόλο της αυτοματοποίησης των συγκοινωνιών στις μέρες μας κα γενικότερα.

Έπειτα, στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε μία αναφορά στο πρόβλημα που θα μελετηθεί, δηλαδή στον σχεδιασμό δικτύου με τροφοδοτικά αυτόνομα λεωφορεία καθώς και στον στόχο της διπλωματικής εργασίας. Επίσης, σχολιάστηκαν οι διαφορές που συναντώνται ανάμεσα στην παρούσα μελέτη και σε άλλες μελέτες που έχουν γίνει επί του θέματος διεθνώς, αλλά και διαφορές που παρουσιάζουν με μοντέλα συμβατικών λεωφορείων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, έγινε μία εκτενής ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με το σχεδιασμό δικτύων τροφοδοτικών γραμμών. Επίσης έγινε αναφορά στις υπηρεσίες Demand-Responsive-Transit, που αποτελούν και αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής καθώς και τα αυτόνομα οχήματα.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάστηκε το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος, μαζί με τις μεταβλητές απόφασης και τους αντίστοιχους περιορισμούς και παρουσιάστηκαν τα δεδομένα της περιοχής μελέτης. Επίσης, έγινε μία εκτενής αναφορά στους Γενετικούς Αλγορίθμους αλλά και στον Αλγόριθμο που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του μοντέλου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, σχολιάστηκαν και παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της εφαρμογής του Γενετικού Αλγορίθμου με τις διάφορες παραμέτρου που λήφθηκαν υπόψη και επιλέχθηκε η βέλτιστη λύση του προβλήματος που προέκυψε από τη βελτιστοποίηση που πραγματοποιήθηκε μέσω του αλγορίθμου. Τέλος, πραγματοποιήθηκε μία ανάλυση ευαισθησίας ως προς τη βέλτιστη λύση διαφοροποιώντας κάποιες παραμέτρους αυτής.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, σχολιάζονται τα αποτελέσματα της εργασίας και προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, το πρόβλημα αυτό έχει καθοριστικό ρόλο στο ρόλο των αστικών συγκοινωνιών, καθώς αποτελεί το πρώτο βήμα στη διαδικασία προγραμματισμού των λεωφορείων.

Η επίλυση του προβλήματος αυτού ουσιαστικά επιφέρει πολλές θετικές επιπτώσεις στη δράση ενός συστήματος μεταφορών αφού μπορεί να εξυπηρετήσει τη ζήτηση οποιουδήποτε συστήματος με τις ελάχιστες διαδρομές που απαιτούνται μέσω των οποίων ελαχιστοποιείται το κόστος μεταφοράς. Με βάση την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε αποδείχθηκε ότι δεν είναι απαραίτητο οι διαδρομές να συσχετίζονται με τον αριθμό των λεωφορείων καθώς ανάλογα με τη ζήτηση που υπάρχει σε κάθε στάση και πόσο αποκλίνει σε σχέση με τη ζήτηση σε άλλες στάσεις μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να χρειάζονται περισσότερα λεωφορεία για την κάλυψη της ζήτησης, ενώ σε άλλες περισσότερες διαδρομές. Όμως εκεί που δεν υπάρχει αμφιβολία, είναι στην περίπτωση της αύξησης της χωρητικότητας των λεωφορείων στην οποία μειώνονται οι διαδρομές και ο στόλος των λεωφορείων.

Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθόδου είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να δώσει τα αποτελέσματα. Παρατηρήθηκε ότι για τα πολλά δεδομένα της εργασίας ο υπολογιστικός χρόνος που χρειάζεται για να δώσει τα βέλτιστα αποτελέσματα είναι πολύ μικρός και επίσης στις περισσότερες περιπτώσεις η ζήτηση ικανοποιείται στο σύνολο με μικρό κόστος μεταφοράς. Τέλος, θα μπορούσε η μεθοδολογία αυτή να χρησιμοποιηθεί και από διάφορους φορείς έτσι ώστε να

μπορούν να βρουν γρήγορα τις διαδρομές στα δίκτυα μελέτης, ανάλογα με τα δεδομένα της ζήτησης, σε σύντομους υπολογιστικούς χρόνους.

5.4 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ

Όπως παρατηρήθηκε, το θέμα που μελετήθηκε παρέχει πολλές ευκαιρίες για μελλοντική έρευνα. Και όπως είναι προφανές το συγκεκριμένο θέμα δεν έχει έναν συγκεκριμένο τρόπο λύσης καθώς διάφοροι παράγοντες μπορούν να ληφθούν υπόψη, μπορεί να υπάρξουν αρκετές παραλλαγές, όπως επίσης μπορεί να υπάρξουν πολλές μεταβλητές σχεδιασμού.

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή ένα από τα μειονεκτήματα του συστήματος αυτού είναι ο περιορισμός της εμβέλειας, καθώς το σύστημα με τα αυτόνομα λεωφορεία μπορεί να εφαρμοστεί σε μικρές περιοχές μέχρι στιγμής.

Μία παραλλαγή ως προς το θέμα που θα μπορούσε κανείς να μελετήσει, είναι η επίπτωση της τεχνολογίας του λεωφορείου, δηλαδή αν είναι συμβατικό ή αυτόνομο. Πιο συγκεκριμένα, θα μπορούσε να μελετηθεί ο σχεδιασμός δικτύου με τροφοδοτικές αυτόνομες και συμβατικές γραμμές, όπου θα συνυπάρχουν σε ένα δίκτυο και συμβατικά και αυτόνομα λεωφορεία. Στο παρελθόν έχουν μελετηθεί η κοινή επίδραση και των δύο τύπων λεωφορείων σε ήδη υπάρχουσα λεωφορειακή γραμμή, αλλά όχι ο σχεδιασμός δικτύου με τους δύο τύπους αυτούς.

Μία δεύτερη παραλλαγή, είναι να ληφθεί υπόψη στο μοντέλο και η γεωμετρία του οδικού δικτύου και πόσο αυτή επηρεάζει την κυκλοφορία των λεωφορείων, ώστε με βάση αυτόν τον παράγοντα να ληφθούν υπόψη παραπάνω μεταβλητές σχεδιασμού. Όμως κάτι τέτοιο θα μπορούσε να επιβραδύνει τους υπολογιστικούς χρόνους εύρεσης βέλτιστης λύσης.

Μία τρίτη παραλλαγή του προβλήματος θα ήταν να χρησιμοποιηθούν ευρετικές μέθοδοι (heuristics methods) για την επίλυση του προβλήματος ή ακόμα και υβριδικές μέθοδοι (hybrid methods), δηλαδή συνδυασμός δύο ή τριών μεθόδων ή συνδυασμός διαφόρων αλγόριθμων, οι οποίες επιφέρουν εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα με αυτά των μετά-ευρετικών.

Μία τελευταία παραλλαγή που θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη, είναι να ληφθεί υπόψη ο παράγοντας καθυστέρησης των λεωφορείων κατά τη διάρκεια των διαδρομών και επίσης η περίπτωση στην οποία μερικοί επιβάτες αποβιβάζονται στις ενδιάμεσες στάσεις που επισκέπτονται τα λεωφορεία. Κάτι τέτοιο θα καθιστούσε το πρόβλημα πιο πολύπλοκο και θα ήταν πιθανό να χρειάζεται μεγάλους υπολογιστικούς χρόνους για να δώσει αποτελέσματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Azad Mojdeh, Hoseinzadeh Nima, Brakewood Candace, Cherry Christopher R., Han Lee D., 2019. «Fully Autonomous Buses: A Literature Review and Future Research Directions», Department of Civil & Environmental Engineering, University of Tennessee, *Journal of Advanced Transportation*, 2019, 1-16.
2. Almasi Mohammad Hadi, Mounes Sina Mirzapour, Karim Mohamed Rehan, 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*, Vol. 11, 507-522.
3. Almasi Mohammad Hadi, Mounes Sina Mirzapour, Koting Suhana, Karim Mohamed Rehan, 2014. «Analysis of Feeder Bus Network Design and Scheduling Problems», Center for Transportation Research, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Malaya, *The Scientific World Journal*, 2014, 1-10.
4. Almasi Mohammad Hadi, Sadollah Ali, Oh Yoonseok, Kim Dong-Kyu, Kang Seungmo, 2018. «Optimal Coordination Strategy for an Integrated Multimodal Transit Feeder Network Design Considering Multiple Objectives», *Sustainability*, 10(3), 734.
5. Bergqvist Oscar, Astrand Mikaela, 2017. «Bus Line Optimisation Using Autonomous Minibuses», [Bachelor's thesis], " KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
6. Bosch Patrick M., Becker Felix, Becker Henrik, Axhausen Kay W., 2018. «Cost-based analysis of autonomous mobility services», *Transport Policy* 64 (2018), 76–91.
7. Charisis Anastasios, Iliopoulou Christina and Kepaptsoglou Konstantinos, 2018. «DRT route design for the first/last mile problem: model and application to Athens, Greece», *Public Transport*, 10(3), 499-527.
8. 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.

9. Deng Lian-bo, Gao Wei, Zhou Wen-liang, Lai Tian-zhen, 2013. «Optimal design of feeder-bus network related to urban rail line based on transfer system», 13th COTA International Conference of Transportation Professionals, Procedia, Social and Behavioral Sciences 96 (2013), 2383-2394.
10. Deng L. B., He Y., Zeng N. X., Zeng J. H., 2020. «Optimal Design of Feeder-Bus Network with Split Delivery», Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 146(3), 04019078.
11. Faisal Asif, Yigitcanlar Tan, Kamruzzaman Md, Currie Graham, 2019. «Understanding autonomous vehicles: A systematic literature review on capability, impact, planning and policy», The Journal of Transport and Land Use, 12(1), 45-72.
12. Guo R., Guan W., Zhang W., Meng F., Zhang Z., 2019. «Customized bus routing problem with time window restrictions: model and case study», Transportmetrica A: Transport Science, 15(2), 1804-1824.
13. Hatzenbuehler Jonas, Cats Oded, Jenelius Erik, 2019. «Optimal allocation of Autonomous Buses in line-based Public Transport Networks», KTH Royal Institute of Technology.
14. Kuanh Geok Koon, Perl Jossef, 1989. «A Methodology for Feeder-Bus Network Design», Transportation Research Record 1120.
15. Lee Young-Jae, Nickkar Amirreza, Meskar Mana, 2019. «Effects of Demand Variation on Optimal Automated Demand Responsive Feeder Transit System Operation in Rural Areas».
16. Li Xin, Wei Ming, Hu Jia, Yuan Yun, Jiang Huifu, 2018. «An Agent-Based Model for Dispatching Real-Time Demand-Responsive Feeder Bus», Mathematical Problems in Engineering, Volume 2018, 1-11.
17. Litman Todd, 2020. «Autonomous Vehicle Implementation Predictions - Implications for Transport Planning», Victoria Transport Policy Institute.
18. Pakusch Christina, Bossauer Paul, 2017. «User Acceptance of Fully Autonomous Public Transport», Department of Management Sciences, Bonn-Rhein-Sieg University,

In Proceedings of the 14th International Joint Conference on e-Business and Telecommunications (ICETE 2017) - Volume 2: ICE-B, pages 52-60.

19. Papanikolaou A., Basbas S., 2020. «Analytical models for comparing Demand Responsive Transport with bus services in low demand interurban areas», *Transportation Letters*, 1-8.

20. Pinto Helen K.R.F., Hyland Michael F., Mahmassani Hani S., Verbas I. Ömer, 2019. «Joint design of multimodal transit networks and shared autonomous mobility fleets», *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 113, Pages 2-20.

21. Sun Bo, Wei Ming, Yang Chunfeng, Xu Zhihuo, Wang Han, 2018. «Personalised and Coordinated Demand-Responsive Feeder Transit Service Design: A Genetic Algorithms Approach», *Future Internet*, 2018, 10(7), 61.

22. Zhang Wei, Jenelius Erik, Badia Hugo, 2019. «Efficiency of Connected Semi-Autonomous Platooning Bus Services in High-Demand Transit Corridors», *Division of Transport Planning, KTH Royal Institute of Technology*.

23. Zhang Wei, Jenelius Erik, Badia Hugo, 2019. «Efficiency of Semi-Autonomous and Fully Autonomous Bus Services in Trunk-and-Branched Networks», *Division of Transport Planning, KTH Royal Institute of Technology, Journal of Advanced Transportation*, 2019, 1-17.

24. Zhu Zhenjun, Guo Xiucheng, Zeng Jun, Zhang Shengrui, 2017. «Route Design Model of Feeder Bus Service for Urban Rail Transit Stations», *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 1-6.

25. Evolver The Genetic Algorithm Solver for Microsoft Excel, 2013. Palisade Corporation, Ithaca, NY USA.

26. *Handbook of Metaheuristics (Second Edition)*, 2010. International Series in Operations Research and Management Science, Volume 146.

27. Γεωργόπουλος Ευστράτιος Φ., Λυκοθανάσης Σπυρίδων Δ., 1999. «Εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγόριθμους», Πανεπιστήμιο Πατρών.

28. Καμπουρλάζος Βασίλειος, 2015. «Κεφάλαιο 3: Εξελικτικός Υπολογισμός».

29. Λυκοθανάσης Σπυρίδων, 2001. «Γενετικοί Αλγόριθμοι και Εφαρμογές», Τόμος Γ', Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.
30. Τσούλος Ιωάννης Γ., 2008. «Γενετικοί Αλγόριθμοι - Κεφάλαιο 3: Γενετικοί Τελεστές».
31. Χαρίσης Αναστάσιος, 2016. «Βέλτιστος Σχεδιασμός Δικτύου Τροφοδοτικών Λεωφορείων σε Σύστημα Μετρό».

ΚΩΔΙΚΑΣ

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 Sub

Sub init_pop_gen()

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
```

```
            tb(i - 1) = Worksheets("visual").Cells(j, 3).Value
```

```
            d(i - 1) = Worksheets("demand").Cells(j - 16, 23).Value
```

```
        End If
```

```
    Next j
```

```
Next i
```

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

```
Total = 0
```

```
rtnum = 1
```

```
stopit = 0
```

```
i = 1
```

```
ID = 1
```

```
NodesUnsIn = 0
```

```
bus0 = 1
```

While Not stopit = 1

Total = Total + d(i)

If Total < cap Then

free = cap - Total

unserv(i) = 0

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

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

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

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

ind(i) = rtnum

bus(i) = bus0

i = i + 1

End If

If Total = cap Then

unserv(i) = 0

Worksheets("visual").Cells(i + 1, 5).Value = 0

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

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

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

ind(i) = rtnum

rtnum = rtnum + 1

bus(i) = bus0

bus0 = bus0 + 1

Total = 0

i = i + 1

ID = i

End If

```

If Total > cap Then
  free = cap - (Total - d(i))
  unserv(i) = d(i) - free
  ind(i) = rtnum
  Total = 0
  Worksheets("visual").Cells(i + 1, 5).Value = 0
  Worksheets("visual").Cells(i + 1, 6).Value = unserv(i)
  NodesUnsIn = NodesUnsIn + 1
  NodesUns(NodesUnsIn) = an(i)
  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

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)

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)
    dist = dist + Worksheets("times").Cells(3 + an(j), 2 + an(j + 1)).Value + st(j)
Next j

tot1(k) = dist + st(b) + dist0a + distb0
If tot1(k) > 0.6 Then pen(k) = tot1(k) - 0.6
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

Totalcost1 = tota + totb + un + rtnum
Worksheets("visual").Cells(3, 2).Value = 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
            tb(i - 1) = Worksheets("visual2").Cells(j, 3).Value
            d(i - 1) = Worksheets("demand").Cells(j - 16, 24).Value
        End If
    Next j
Next i

cap = Worksheets("visual2").Cells(38, 2).Value
Total = 0
rtnum = 1
stopit = 0
i = 1
ID = 1
NodesUnsln = 0
bus0 = 1

```

While Not stopit = 1

Total = Total + d(i)

If Total < cap Then

free = cap - Total

unserv(i) = 0

Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 5).Value = free

Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 6).Value = 0

Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 7).Value = 0

Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 8).Value = unserv(i)

ind(i) = rtnum

bus(i) = bus0

i = i + 1

End If

If Total = cap Then

unserv(i) = 0

Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 5).Value = 0

Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 6).Value = 0

Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 7).Value = 0

Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 8).Value = unserv(i)

ind(i) = rtnum

rtnum = rtnum + 1

bus(i) = bus0

bus0 = bus0 + 1

Total = 0

i = i + 1

ID = i

End If

If Total > cap Then

free = cap - (Total - d(i))

unserv(i) = d(i) - free

ind(i) = rtnum

Total = 0

Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 5).Value = 0

Worksheets("visual2").Cells(i + 1, 6).Value = unserv(i)

NodesUnsIn = NodesUnsIn + 1

NodesUns(NodesUnsIn) = an(i)

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
        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)

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)
        dist = dist + Worksheets("times2").Cells(3 + an(j), 2 + an(j + 1)).Value + st(j)
    Next j

```

```

tot1(k) = dist + st(b) + dist0a + distb0
  If tot1(k) > 0.6 Then pen(k) = tot1(k) - 0.6
  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

Totalcost1 = tota + totb + un + rtnum
Worksheets("visual2").Cells(3, 2).Value = 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
    tb(i - 1) = Worksheets("visual3").Cells(j, 3).Value
    d(i - 1) = Worksheets("demand").Cells(j - 16, 25).Value
End If
Next j
Next i

```

```
cap = Worksheets("visual3").Cells(38, 2).Value
```

```
Total = 0
```

```
rtnum = 1
```

```
stopit = 0
```

```
i = 1
```

```
ID = 1
```

```
NodesUnsln = 0
```

```
bus0 = 1
```

```
While Not stopit = 1
```

```
Total = Total + d(i)
```

```
If Total < cap Then
```

```
    free = cap - Total
```

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

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

```
    Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 6).Value = 0
```

```
    Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 7).Value = 0
```

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

```
    ind(i) = rtnum
```

```
    bus(i) = bus0
```


i = i + 1

End If

If Total = cap Then

unserv(i) = 0

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

Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 6).Value = 0

Worksheets("visual3").Cells(i + 1, 7).Value = 0

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

ind(i) = rtnum

rtnum = rtnum + 1

bus(i) = bus0

bus0 = bus0 + 1

Total = 0

i = i + 1

ID = i

End If

If Total > cap Then

free = cap - (Total - d(i))

unserv(i) = d(i) - free

ind(i) = rtnum

Total = 0

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

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

NodesUnsIn = NodesUnsIn + 1

NodesUns(NodesUnsIn) = an(i)

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

```

```

        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)
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)
        dist = dist + Worksheets("times3").Cells(3 + an(j), 2 + an(j + 1)).Value + st(j)
    Next j

    tot1(k) = dist + st(b) + dist0a + distb0
    If tot1(k) > 0.6 Then pen(k) = tot1(k) - 0.6 ' pouni 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
Totalcost1 = tota + totb + un + rtnum
Worksheets("visual3").Cells(3, 2).Value = Totalcost1

```

End Sub

Function totalcost(Value1) As Single

```

Dim c(15) As Integer

Dim servt(15) As Single, d(15) As Single, pen() As Double, unserv(15) As Integer,
NodesUnsLine(15) As Integer, ind2(15) As Integer

Dim ss(15) As Single, NodesUns(15) As Integer, st(15) As Single, UnsDemNod(15) As Integer

Dim an(15), ind(15) As Integer, tb(15) As Single, srpos(), srpos2(), tot1(), tot2() As Single,
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
            tb(i - 1) = Worksheets("visual").Cells(j, 3).Value
            d(i - 1) = Worksheets("demand").Cells(j - 16, 23).Value

        End If
    
```

```

    Next j
Next i

cap = Worksheets("visual").Cells(38, 2).Value
Total = 0
rtnum = 1
stopit = 0
i = 1
ID = 1
NodesUnsln = 0
bus0 = 1

While Not stopit = 1

Total = Total + d(i)

If Total < cap Then
    free = cap - Total
    unserv(i) = 0
    ind(i) = rtnum
    bus(i) = bus0
    i = i + 1
End If

If Total = cap Then
    unserv(i) = 0
    ind(i) = rtnum
    rtnum = rtnum + 1
    bus(i) = bus0
    bus0 = bus0 + 1
    Total = 0
    i = i + 1

```

```

    ID = i
End If

If Total > cap Then
    free = cap - (Total - d(i))
    unserv(i) = d(i) - free
    ind(i) = rtnum
    Total = 0
    NodesUnsln = NodesUnsln + 1
    NodesUns(NodesUnsln) = an(i)
    NodesUnsline(NodesUnsln) = 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

basicroutes = rtnum

```

```

ReDim srpos(rtnum + 1), pen(rtnum)
counter = 0
ind(0) = 0

For i = 1 To 15
  If ind(i - 1) < ind(i) Then
    counter = counter + 1
    srpos(counter) = i
    basicroutes = counter
  End If
Next i
srpos(basicroutes + 1) = 16
tot = 0
ReDim tot1(basicroutes + 1)
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)
    dist = dist + Worksheets("times").Cells(3 + an(j), 2 + an(j + 1)).Value + st(j)
  Next j

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

tota = 0
totb = 0
p = 10
For k = 1 To basicroutes

```

```
If tot1(k) > 0.6 Then pen(k) = tot1(k) - 0.6
If pen(k) > 0 Then tot1(k) = tot1(k) * p * Exp(pen(k))
```

```
    tota = tota + tot1(k)
```

```
Next k
```

```
un = 0
```

```
For i = 1 To 15 'to 15
```

```
    un = un + unserv(i)
```

```
Next i
```

```
tc = tota + totb + un + rtnum
```

```
totalcost = tc
```

```
End Function
```

```
Function totalcost2(Value1) As Single
```

```
Dim c(15) As Integer
```

```
Dim servt(15) As Single, d(15) As Single, pen() As Double, unserv(15) As Integer,  
NodesUnsLine(15) As Integer, ind2(15) As Integer
```

```
Dim ss(15) As Single, NodesUns(15) As Integer, st(15) As Single, UnsDemNod(15) As Integer
```

```
Dim an(15), ind(15) As Integer, tb(15) As Single, srpos(), srpos2(), tot1(), tot2() As Single,  
bus(15) As Integer
```

```
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
        tb(i - 1) = Worksheets("visual2").Cells(j, 3).Value
        d(i - 1) = Worksheets("demand").Cells(j - 16, 24).Value
    End If
Next j
Next i

```

```
cap = Worksheets("visual2").Cells(38, 2).Value
```

```
Total = 0
```

```
rtnum = 1
```

```
stopit = 0
```

```
i = 1
```

```
ID = 1
```

```
NodesUnsln = 0
```

```
bus0 = 1
```

```
While Not stopit = 1
```

```
Total = Total + d(i)
```

```
If Total < cap Then
```

```
    free = cap - Total
```

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

```
    ind(i) = rtnum
```

```
    bus(i) = bus0
```

```
    i = i + 1
```

```
End If
```

```
If Total = cap Then
```

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

```
    ind(i) = rtnum
```

```

    rtnum = rtnum + 1
    bus(i) = bus0
    bus0 = bus0 + 1
    Total = 0
    i = i + 1
    ID = i
End If
If Total > cap Then
    free = cap - (Total - d(i))
    unserv(i) = d(i) - free
    ind(i) = rtnum
    Total = 0
    NodesUnsln = NodesUnsln + 1
    NodesUns(NodesUnsln) = an(i)
    NodesUnslnLine(NodesUnsln) = 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

basicroutes = rtnum

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

  counter = 0

  ind(0) = 0

For i = 1 To 15
  If ind(i - 1) < ind(i) Then
    counter = counter + 1
    srpos(counter) = i
    basicroutes = counter
  End If
Next i

srpos(basicroutes + 1) = 16

tot = 0

ReDim tot1(basicroutes + 1)

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)
    dist = dist + Worksheets("times2").Cells(3 + an(j), 2 + an(j + 1)).Value + st(j)
  Next j
  tot1(k) = dist + st(b) + dist0a + distb0
Next k

tota = 0
totb = 0
p = 10
For k = 1 To basicroutes

```

```

If tot1(k) > 0.6 Then pen(k) = tot1(k) - 0.6
If pen(k) > 0 Then tot1(k) = tot1(k) * p * Exp(pen(k))
    tota = tota + tot1(k)
Next k
un = 0
For i = 1 To 15 'to 15
    un = un + unserv(i)
Next i
tc = tota + totb + un + rtnum
totalcost2 = tc

```

End Function

Function totalcost3(Value1) As Single

```

Dim c(15) As Integer
Dim servt(15) As Single, d(15) As Single, pen() As Double, unserv(15) As Integer,
NodesUnsLine(15) As Integer, ind2(15) As Integer
Dim ss(15) As Single, NodesUns(15) As Integer, st(15) As Single, UnsDemNod(15) As Integer
Dim an(15), ind(15) As Integer, tb(15) As Single, srpos(), srpos2(), tot1(), tot2() As Single,
bus(15) As Integer

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
            tb(i - 1) = Worksheets("visual3").Cells(j, 3).Value
            d(i - 1) = Worksheets("demand").Cells(j - 16, 25).Value

```

```

        End If
    Next j
Next i
cap = Worksheets("visual3").Cells(38, 2).Value
Total = 0
rtnum = 1
stopit = 0
i = 1
ID = 1
NodesUnsln = 0
bus0 = 1

While Not stopit = 1

Total = Total + d(i)

If Total < cap Then
    free = cap - Total
    unserv(i) = 0
    ind(i) = rtnum
    bus(i) = bus0
    i = i + 1
End If

If Total = cap Then
    unserv(i) = 0
    ind(i) = rtnum
    rtnum = rtnum + 1
    bus(i) = bus0
    bus0 = bus0 + 1
    Total = 0

```

```

i = i + 1
ID = i
End If
If Total > cap Then
  free = cap - (Total - d(i))
  unserv(i) = d(i) - free
  ind(i) = rtnum
  Total = 0
  NodesUnsln = NodesUnsln + 1
  NodesUns(NodesUnsln) = an(i)
  NodesUnslne(NodesUnsln) = 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
basicroutes = rtnum
  ReDim srpos(rtnum + 1), pen(rtnum)
  counter = 0
  ind(0) = 0

```

```

For i = 1 To 15
    If ind(i - 1) < ind(i) Then
        counter = counter + 1
        srpos(counter) = i
        basicroutes = counter
    End If
Next i
srpos(basicroutes + 1) = 16
tot = 0
ReDim tot1(basicroutes + 1)
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)
        dist = dist + Worksheets("times3").Cells(3 + an(j), 2 + an(j + 1)).Value + st(j)
    Next j
    tot1(k) = dist + st(b) + dist0a + distb0
Next k

tota = 0
totb = 0
p = 10
For k = 1 To basicroutes
    If tot1(k) > 0.6 Then pen(k) = tot1(k) - 0.6
    If pen(k) > 0 Then tot1(k) = tot1(k) * p * Exp(pen(k))

    tota = tota + tot1(k)

```

Next k

un = 0

For i = 1 To 15 'to 15

un = un + unserv(i)

Next i

tc = tota + totb + un + rtnum

totalcost3 = tc

End Function