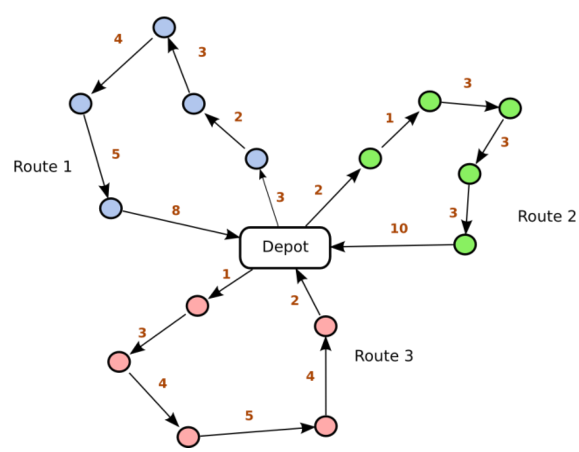
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Δομοστατικής

Διπλωματική εργασία

ΗΛΙΟΠΟΥΛΟΥ ΧΡΙΣΤΙΝΑ

Επιβλέποντες:
Ματθαίος Καρλαύτης - Νίκος Λαγαρός



Βέλτιστος Σχεδιασμός Δικτύου με Περιορισμούς στη Χωρητικότητα

Αθήνα, Ιούλιος 2013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία βέλτιστων διαδρομών για ένα στόλο υδροπλάνων στο Αιγαίο πέλαγος που θα εξυπηρετεί επιβάτες μεταξύ ενός κομβικού λιμένα και 30 περιφερειακών νησιών. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται ως Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων με Περιορισμούς στη Χωρητικότητα και Ταυτόχρονη Παραλαβή και Διανομή και επιλύεται με την εφαρμογή ενός γενετικού αλγόριθμου, ο οποίος δημιουργεί διαδρομές για έναν ομογενή στόλο υδροπλάνων. Επιλέγονται οι παράμετροι του γενετικού αλγόριθμου που δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα και πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο αλγόριθμος είναι σε θέση να δημιουργήσει διαδρομές που εξυπηρετούν την υπάρχουσα ζήτηση σε αποδεκτό υπολογιστικό χρόνο, χρησιμοποιώντας ένα σχετικά μικρό στόλο.

ABSTRACT

This thesis aims to determine optimal routes for a seaplane fleet transporting passengers between a hub and 30 spoke ports in the Aegean sea. The problem is formulated as a Capacitated Vehicle Routing Problem with Simultaneous Deliveries and Pick-ups and solved using a genetic algorithm that establishes routes for a homogeneous seaplane fleet. The genetic algorithm parameters producing the best values are kept and a sensitivity analysis is conducted. Results show that the algorithm is capable of creating routes that satisfy the demand in an acceptable computational time, while using a relatively small fleet.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Τελειώνοντας τη διπλωματική μου εργασία και συνάμα τη φοιτητική μου πορεία νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τους ανθρώπους που είχαν καθοριστική συμβολή και στα δύο.

Έτσι, ευχαριστώ θερμά τον αναπληρωτή καθηγητή Ματθαίο Καρλαύτη, αφενός για το χρόνο, τις συμβουλές, το ενδιαφέρον και τη διορατική καθοδήγηση που μου προσέφερε κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας και αφετέρου, γιατί με την παρουσία του ως καθηγητή και ανθρώπου στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών μου ενέπνευσε το ενδιαφέρον για τη μελέτη των Μεταφορών και εδικά για τα Προβλήματα Δικτύων.

Ευχαριστώ εξίσου θερμά το λέκτορα Κωνσταντίνο Κεπαπτσόγλου για την καθοριστική βοήθειά του στην εκπόνηση αυτής της εργασίας, τις ιδέες του και το χρόνο που αφιέρωσε.

Επίσης, ιδιαίτερες ευχαριστίες στον επίκουρο καθηγητή Νίκο Λαγαρό για τη συνεργασία του.

Τέλος, η συμπαράσταση και ψυχολογική υποστήριξη της οικογένειάς μου και των δικών μου ανθρώπων καθόλη τη διάρκεια της παρούσας διπλωματικής αλλά και των δύσκολων στιγμών της φοιτητικής μου πορείας είναι ανεκτίμητη.

Χριστίνα Ηλιοπούλου

Ιούλιος 2013

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το υδροπλάνο (seaplane) είναι ειδικός τύπος αεροσκάφους που έχει τη δυνατότητα να πλέει και να κινείται στην επιφάνεια της θάλασσας ή και σε ευρεία υδάτινη έκταση (λίμνη ή ποταμό), καθώς και να ξεκινά και να τερματίζει την πτήση του σε υδάτινη επιφάνεια.

Σήμερα, υπάρχουν πολλές περιοχές με μεγάλη ακτογραμμή ή πολλές λίμνες, οι οποίες χαρακτηρίζονται από κακή προσβασιμότητα. Η πρόσβαση στις περιοχές αυτές θα μπορούσε να βελτιωθεί με επιπλέον εναέρια κυκλοφορία, με τη δημιουργία ενός συστήματος υδροπλάνων. Με αυτό τον τρόπο, θα καταστεί δυνατή η ανάπτυξη νέων μεταφορικών συνδέσεων και η απευθείας σύνδεση των παράκτιων περιοχών με εθνικά και διεθνή αεροδρόμια, με το πλεονέκτημα των πτήσεων μικρής διάρκειας και της χρήσης φυσικών διαδρόμων προσγείωσης.

Γενικά, η χρήση των υδροπλάνων, μέχρι στιγμής, διακρίνεται στις παρακάτω κατηγορίες (Gobbi et al, 2013):

- **Ψυχαγωγία:** Το μεγαλύτερο ποσοστό υδροπλάνων χρησιμοποιείται από ιδιώτες για ψυχαγωγικούς σκοπούς (μονοθέσια και διθέσια οχήματα).
- **Μικρές επιχειρήσεις:** Αεροσκάφη δύο ως τεσσάρων θέσεων χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση ιδιωτικών πτήσεων, τη μεταφορά μικρών ομάδων τουριστών σε ειδικούς προορισμούς, αλλά και για εκπαίδευση χειριστών από ειδικές σχολές. Τέτοιες επιχειρήσεις συναντώνται στον Καναδά, στις ΗΠΑ και στην Αυστραλία.
- **Τακτικοί επιβάτες:** Στα κλασικά δίκτυα αερομεταφορών προσφέρονται προγραμματισμένες πτήσεις από τα μικρότερα αεροδρόμια σε κομβικά αεροδρόμια ή πτήσεις μεταξύ των μικρότερων αερολιμένων. Στις επιχειρήσεις υδροπλάνων, όμως, είναι δυνατές τρεις εναλλακτικές χρήσεις των αεροσκαφών για τοπικές επιβατικές μεταφορές:
    1. Η πτήση από το πλησιέστερο αεροδρόμιο της ξηράς στο λιμάνι (υδατοδρόμιο) ή αντίστροφα.

2. Η πτήση μεταξύ δύο υδατοδρομίων.
3. Η πτήση από αεροδρόμιο σε υδατοδρόμιο που βρίσκεται σε μακρινή απόσταση (π.χ. μεταφορές μεταξύ επιλεγμένων μεγάλων αεροδρομίων και τοπικών τουριστικών θερέτρων).

Οι παραπάνω τύποι πτήσεων προσφέρονται, μέχρι στιγμής, μόνο στις ΗΠΑ, στον Καναδά, στις Μαλδίβες και στη Μάλτα και εξυπηρετούν άτομα που μετακινούνται για εργασία ή αναψυχή.

- **Ειδικές χρήσεις:** Αρκετά σκάφη χρησιμοποιούνται για μεταφορά φορτίων ή ως οχήματα διάσωσης από ιδιώτες ή εθνικούς και διεθνείς οργανισμούς. Το μεγαλύτερο ποσοστό υδροπλάνων που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία χρησιμοποιείται στην πυρόσβεση, όπου παρουσιάζουν μεγάλη αποτελεσματικότητα.

Είναι σαφές πως πρόκειται για μια εξειδικευμένη αγορά με τοπικές ιδιαιτερότητες, όπου ο ανταγωνισμός είναι χαμηλός, λόγω του μικρού αριθμού επιχειρήσεων, με αποτέλεσμα να είναι ευνοϊκές οι συνθήκες για τους νεοεισερχόμενους. Ωστόσο, σε ό,τι αφορά σε νέες επιχειρήσεις που πραγματοποιούν πτήσεις μεγαλύτερων αποστάσεων, ο ανταγωνισμός με τις αεροπορικές εταιρείες χαμηλού κόστους επιβάλλει χαμηλές τιμές εισιτηρίων. Όσο για μεσαίες αποστάσεις, ο ανταγωνισμός με τις ακτοπλοϊκές εταιρείες είναι ένα ζήτημα που θα πρέπει να διερευνηθεί ανά περίπτωση, κυρίως στη σύνδεση νησιωτικών περιοχών με κεντρικά λιμάνια. Η επιτυχία των εταιρειών υδροπλάνων που λειτουργούν σήμερα εξασφαλίζεται χάρη στις σχετικά χαμηλές τιμές εισιτηρίου και στη σημαντική εξοικονόμηση χρόνου που προσφέρουν σε σχέση με τις θαλάσσιες μεταφορές.

Σε ότι αφορά στο κόστος χρήσης του μέσου, σε διεθνές επίπεδο, η έρευνα τιμών δείχνει ότι το εισιτήριο του υδροπλάνου πρέπει να είναι 6 έως 10 φορές πιο ακριβό, σε σύγκριση με άλλα μέσα μεταφοράς (Gobbi et al, 2013). Στον Καναδά για παράδειγμα, η πτήση από το Βανκούβερ στο νησί του Βανκούβερ διαρκεί περίπου 15 λεπτά, ενώ το πλοίο χρειάζεται περίπου 1,5 ώρες. Το κόστος του εισιτηρίου είναι 145 δολάρια για την πτήση και 15 δολάρια για τη μεταφορά με το πλοίο. Στη Μάλτα, το απλό εισιτήριο για έναν ενήλικα είναι περίπου 5 € για το πλοίο και 50 € για το υδροπλάνο. Και στις δύο περιπτώσεις, η τιμή του εισιτηρίου του υδροπλάνου αποδεικνύεται ανταγωνιστική έναντι του πλοίου και ο συντελεστής πληρότητας είναι αρκετά υψηλός.

Συνοπτικά, το υδροπλάνο ως μέσο παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, στα οποία μπορεί να στηριχθεί η ανάπτυξη δικτύων υδροπλάνων. Τα βασικότερα είναι τα εξής:

- Η ευκολία χρήσης μεταξύ περιοχών με πολλά νησιά και υδάτινες επιφάνειες.
- Η ταχύτερη εξυπηρέτηση σε σύγκριση με τα πλοία κατά τη σύνδεση της ηπειρωτικής περιοχής με νησιά ή μεταξύ νησιών (π.χ. Ελλάδα, Ηνωμένο Βασίλειο, Ιρλανδία, κλπ) και η δυνατότητα απευθείας πτήσεων από τις μεγάλες εσωτερικές πόλεις που μπορούν να εξυπηρετήσουν συγκεκριμένες ομάδες επιβατών.
- Η φιλική προς το περιβάλλον λειτουργία. Τα υδροπλάνο θα μπορούσε να είναι πολύ δημοφιλές λόγω της μη επιβάρυνσης του περιβάλλοντος, ζήτημα που απασχολεί πλέον πολύ την κοινή γνώμη.
- Η αντισυμβατική εμπειρία σε σχέση με τα υπόλοιπα μέσα μεταφοράς (ιδίως για τους τουρίστες).
- Η γρήγορη εξυπηρέτηση χωρίς τη συνήθη αεροναυτική γραφειοκρατία.
- Η δυνατότητα διεύρυνσης του δικτύου των αερομεταφορών με την προσθήκη περισσότερων περιοχών με την παράλληλη μείωση της συμφόρησης των αεροδρομίων.

1.2 Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

Η πρόσβαση στα ελληνικά νησιά, τα οποία προσελκύουν μεγάλο αριθμό επισκεπτών κατά τους θερινούς μήνες, γίνεται μέσω πλοίου ή και αεροπλάνου, σε κάποιες περιπτώσεις. Ωστόσο, τα δύο αυτά μέσα εξαρτώνται άμεσα από τις διαθέσιμες λιμενικές ή αεροπορικές υποδομές, ενώ οι καθυστερήσεις και τα προβλήματα λόγω του μεγάλου όγκου ταξιδιωτών είναι συχνό φαινόμενο. Τα προβλήματα αυτά μπορεί δυνητικά να επιλύσει το υδροπλάνο, το οποίο μπορεί να μεταφέρει εύκολα και γρήγορα ταξιδιώτες στα πιο απομακρυσμένα νησιά, με ελάχιστες απαιτήσεις σε υποδομή.

Η Ελλάδα, δεδομένου της μεγάλης της ακτογραμμής, της πληθώρας μικρών νησιών και των περιορισμένων υποδομών αερομεταφορών, προσφέρεται για ανάπτυξη δικτύου υδροπλάνων, τα οποία θα έχουν πρόσβαση σε νησιά που δεν έχουν αεροδρόμια και σε όσα οι υπάρχουσες μεταφορικές συνδέσεις δεν επαρκούν. Τα περισσότερα νησιά εξυπηρετούνται μέσω τακτικών δρομολογίων πλοίων, ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις οι ελλιπείς υποδομές και η μικρή ζήτηση δυσχεραίνουν την επικοινωνία τους με την ηπειρωτική Ελλάδα. Ένα πλοίο με χωρητικότητα 500 επιβατών θα έχει ζημία αν εκτελέσει δρομολόγιο με 30 επιβάτες. Τα υδροπλάνα, όμως, με χωρητικότητα 19 επιβάτες θα λειτουργούν με 100% πληρότητα. Επίσης, έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν φορτίο 1,5 – 2 τόνων, σε περιπτώσεις που το πλοίο δε μπορεί να τροφοδοτήσει κάποιο νησί.

Σε ότι αφορά στην περίπτωση της Ελλάδας, θα πρέπει να εξεταστεί εάν το υδροπλάνο αποτελεί βιώσιμη επιλογή για το ευρύ κοινό ή απευθύνεται αποκλειστικά σε όσους έχουν υψηλό εισόδημα. Ειδικά για νησιά που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από το κεντρικό λιμάνι, το κόστος της διαδρομής είναι σημαντικό. Με βάση τα υπάρχοντα στοιχεία, το κόστος για ένα τυπικό υδροπλάνο ανέρχεται στα 6.8 ευρώ ανά ναυτικό μίλι ή 871 ευρώ ανά ώρα. Επομένως, για μια διαδρομή, για παράδειγμα, από και προς το Καστελόριζο, τα έξοδα λειτουργίας ανέρχονται σε 205 ευρώ ανά επιβάτη για συντελεστή πλήρωσης 100%. Γίνεται σαφές, άρα, πως υπό αυτές τις συνθήκες, το υδροπλάνο δεν είναι προσιτό για την πλειοψηφία του επιβατικού κοινού.

1.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ωθούμενη από τη διαπίστωση της χρησιμότητας των υδροπλάνων, αλλά και την προαναγγελία της επαναφοράς τους στην Ελλάδα, η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το σχεδιασμό ενός δικτύου υδροπλάνων στο Αιγαίο, που θα συνδέει τη νησιωτική περιοχή με την ηπειρωτική Ελλάδα με κομβικό λιμάνι το Λαύριο. Η εργασία αυτή αντιμετωπίζει το πρόβλημα σε επιστημονικό πλαίσιο και κατάλληλο μαθηματικό υπόβαθρο, στοχεύοντας παράλληλα στη δημιουργία ενός ρεαλιστικού μοντέλου, που μπορεί να εφαρμοσθεί στην πράξη.

Σκοπός της συγκεκριμένης μεθοδολογικής προσέγγισης είναι ο βέλτιστος σχεδιασμός του δικτύου υδροπλάνων, ώστε να ελαχιστοποιείται η χρονική διάρκεια των διαδρομών, ο αριθμός των διαδρομών που απαιτούνται καθώς και ο αριθμός των επιβατών που δεν μπορούν να εξυπηρετηθούν στους ενδιάμεσους σταθμούς. Με αυτό τον τρόπο υιοθετείται μια ρεαλιστική προσέγγιση, αφού αφενός ελαχιστοποιείται το κόστος του μεταφορέα, αφετέρου διασφαλίζεται η εξυπηρέτηση όσο το δυνατόν περισσότερων επιβατών μεταξύ διαδοχικών νησιών.

Η παρούσα εργασία είναι, στο βαθμό που γνωρίζουμε, μέχρι στιγμής η πρώτη που αντιμετωπίζει το πρόβλημα του σχεδιασμού δικτύου υδροπλάνων. Επίσης, παρά το γεγονός ότι πολλές εργασίες αντιμετωπίζουν το αντίστοιχο πρόβλημα της Δρομολόγησης Οχημάτων με Παραλαβή και Διανομή, στην εργασία αυτή λαμβάνονται υπόψη και επιβάτες που δεν έχουν ως αφετηρία ή προορισμό το κεντρικό λιμάνι. Επιπρόσθετα, το μοντέλο που αναπτύσσεται αντιμετωπίζει άμεσα τη δημιουργία διαδρομών με βάση την επιβατική ζήτηση, χωρίς την απαίτηση πολυεπίπεδης βελτιστοποίησης.

1.4 ΔΟΜΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η εργασία αποτελείται από έξι κεφάλαια, συμπεριλαμβανόμενης και της εισαγωγής και από το παράρτημα.

Το κεφάλαιο 1 αποτελεί το εισαγωγικό κεφάλαιο, όπου εξηγήθηκε ο σκοπός και η χρησιμότητα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται ανασκόπηση της υφιστάμενης βιβλιογραφίας σχετικά με τα δίκτυα αερομεταφορών, καθώς δεν έχει, μέχρι στιγμής, γίνει κάποια εργασία για δίκτυα υδροπλάνων.

Στο κεφάλαιο 3 πραγματοποιείται μια εισαγωγή στο Πρόβλημα της Δρομολόγησης Οχημάτων και στη συνέχεια, αναλύεται το Πρόβλημα της Δρομολόγησης Οχημάτων με Παραλαβή και Διανομή ως το πρόβλημα που πραγματεύεται η παρούσα εργασία. Ακολούθως, γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στους γενετικούς αλγόριθμους και εξηγείται η επιλογή τους για το πρόβλημα που αντιμετωπίζει η εργασία αυτή, ενώ αναπτύσσεται ο αλγόριθμος επίλυσης.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του αλγόριθμου και πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας για ορισμένες παραμέτρους του προβλήματος.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία μας και διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις για περεταίρω έρευνα.

Στο κεφάλαιο 6 δίνεται η λίστα με τις βιβλιογραφικές αναφορές.

Στο παράρτημα παρουσιάζεται ο κώδικας σε Visual Basic που χρησιμοποιήθηκε στην εφαρμογή του γενετικού αλγόριθμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην ενότητα αυτή γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στο πρόβλημα σχεδιασμού δικτύου, αναφέρονται οι κύριες παραλλαγές του και δίνεται η μαθηματική του διατύπωση. Ακολούθως, γίνεται ανασκόπηση των κυριότερων εργασιών που αφορούν στα δίκτυα αερομεταφορών, όπου διακρίνονται τα στατικά ή ντετερμινιστικά και τα στοχαστικά ή πιθανοτικά μοντέλα.

2.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

2.2.1 Ορισμός

Το πρόβλημα δικτύου αφορά στην περίπτωση «οποιουδήποτε συνδυασμού ανθρώπων, δραστηριοτήτων αλλά και αντικειμένων, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με νοητές ή απτές διασυνδέσεις για την επίτευξη ενός έργου ή μεταφοράς ή απλής επικοινωνίας» (Καρλαύτης και Λαγαρός, 2010).

Σε γενικές γραμμές, το πρόβλημα σχεδιασμού δικτύου περιλαμβάνει την ελαχιστοποίηση ή τη μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία εκφράζει τον επιδιωκόμενο στόχο και υπόκειται σε μια ποικιλία περιορισμών, οι οποίοι αντανακλούν τις απαιτήσεις απόδοσης του συστήματος ή/και τους περιορισμούς των πόρων. Υπάρχουν δύο τύποι δικτύων στις μεταφορές: φορτίων και οχημάτων, όπου το πρόβλημα σχεδιασμού είναι, συνήθως, η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους του δικτύου, ενώ ικανοποιείται η ζήτηση και επιτυγχάνεται το επιθυμητό επίπεδο εξυπηρέτησης.

Σε κάθε πρόβλημα συγκοινωνιακού δικτύου, υπάρχουν δύο υπό-προβλήματα: η σύνθεση του δικτύου και η ανάλυση του δικτύου. Το πρόβλημα σύνθεσης δικτύου ασχολείται με τη διαμόρφωση των γραμμών και τον καθορισμό των διαδρομών και των συχνοτήτων. Αφού μια συγκεκριμένη διαμόρφωση δικτύου έχει συντεθεί, το δίκτυο αξιολογείται με βάση οικονομικές, λειτουργικές, περιβαλλοντικές και άλλες μελέτες. Η αξιολόγηση που περιλαμβάνει μία ή περισσότερες από αυτές τις μελέτες ονομάζεται ανάλυση δικτύων και σχετίζεται με την εξέταση και την αξιολόγηση του εναλλακτικού δικτύου. Τυπικώς, στο στάδιο του σχεδιασμού ενός συστήματος μεταφοράς συντίθενται διάφορες πιθανές διαμορφώσεις του δικτύου. Στη συνέχεια εκτελούνται αναλύσεις για κάθε μία από αυτές, καταλήγοντας σε μια τελική επιλογή δικτύου. Συνοψίζοντας, η σύνθεση του δικτύου αναφέρεται στην διαμόρφωση της τοπολογίας του δικτύου εκ των προτέρων, ενώ η ανάλυση του δικτύου ασχολείται με την αξιολόγηση μιας συγκεκριμένης διαμόρφωσης δικτύου εκ των υστέρων (Chan, 1974).

2.2.2 Κατηγοριοποίηση των προβλημάτων δικτύου

Σε γενικές γραμμές, τα προβλήματα δικτύου κατατάσσονται σε εκείνα όπου υποθέτουμε ότι οι σύνδεσμοι δεν έχουν συγκεκριμένη μεταφορική ικανότητα (uncapacitated) ή σε εκείνα όπου υποθέτουμε ότι έχουν (capacitated). Στα πρώτα επιλέγονται μεταξύ των σημείων προέλευσης και προορισμού οι συντομότερες διαδρομές . Σε ό,τι αφορά σε όσα έχουν συγκεκριμένη μεταφορική ικανότητα, υπάρχουν δύο κατηγορίες: η ρυθμιστική (prescriptive) έναντι της περιγραφικής (descriptive) προσέγγισης (Chan, 1974). Ενώ και οι δύο προσεγγίσεις κατανέμουν τη ζήτηση στη συντομότερη ή k-οστή συντομότερη διαδρομή, βασίζονται σε εντελώς διαφορετικές υποθέσεις.

Η περιγραφική υπόθεση της ροής της επιβατικής κίνησης είναι επίσης γνωστή ως "βέλτιστη προς το χρήστη" (user-optimizing) προσέγγιση. Περιγράφει την παρατηρούμενη συμπεριφορά των περισσότερων μεταφερόμενων, όπου κάθε χρήστης του δικτύου επιλέγει τη βέλτιστη για τον ίδιο διαδρομή και ως εκ τούτου ανταγωνίζεται με ένα άλλο χρήστη για τις περιορισμένες μεταφορικές ικανότητες των συνδέσμων. Οι προσεγγίσεις αυτές βασίζονται συνήθως σε επαναληπτικές αριθμητικές διαδικασίες (Shier, 1976).

Από την άλλη πλευρά, η ρυθμιστική υπόθεση είναι γνωστή ως "βέλτιστη προς το σύστημα" (system-optimizing) προσέγγιση. Αυτή η παραδοχή προσομοιώνει ένα κεντρικό σύστημα λήψης αποφάσεων, όπου οι χρήστες λαμβάνουν εντολές «άνωθεν» σχετικά με τις διαδρομές για τα ταξίδια τους (και δεν επιλέγουν ο ίδιοι), έτσι ώστε οι περιορισμένες δυνατότητες του δικτύου να χρησιμοποιούνται καλύτερα ως σύνολο. Οι ρυθμιστικές προσεγγίσεις μπορεί να ορίζουν ότι οι χρήστες θυσιάζουν την προσωπική άνεση για ένα συλλογικό στόχο. Τα προβλήματα αυτά συνήθως διατυπώνονται ως ακέραια προβλήματα πολλαπλών ροών (multicommodity-flow integer programs) (Minoux, 2001).

2.2.3 Η διατύπωση του προβλήματος

Γενικά ένα δίκτυο μεταφοράς ορίζεται ως ένα πεπερασμένο σύνολο κόμβων V, που χωρίς βλάβη της γενικότητας μπορεί να ταυτιστεί με το σύνολο $\{1, \ldots, N\}$ για κάποιο $N < \infty$, και ένα σύνολο ακμών E. Μια ακμή προσδιορίζεται μονοσήμαντα από ένα διατεταγμένο ζεύγος (i, j) με $i, j \in V, i \neq j$. Επομένως, το σύνολο των ακμών είναι $E \subset V \times V$. Σε κάθε ακμή (i, j) αντιστοιχεί ένα κόστος c_{ij} και μια χωρητικότητα (capacity) u_{ij}. Το c_{ij} αντιπροσωπεύει το κόστος ανά μονάδα μεταφερόμενης ποσότητας κατά μήκος της ακμής (i, j) και το u_{ij} τη μέγιστη ποσότητα που μπορεί να μεταφερθεί κατά μήκος της ακμής. Τέλος, σε κάθε κόμβο i αντιστοιχούν η διαθέσιμη (εισερχόμενη) και απαιτούμενη (εξερχόμενη) ποσότητα a_i και b_i αντίστοιχα.

Από τη φύση του, το γενικότερο πρόβλημα του σχεδιασμού δικτύου ανήκει στην κατηγορία NP-hard (Lenstra and Kan, 1981), δηλαδή δεν επιλύεται σε πολυωνυμικό χρόνο, ενώ ο χρόνος επίλυσης αυξάνεται εκθετικά ως προς το μέγεθός του. Συνεπώς, δεν μπορεί να υπάρξει ντετερμινιστικός αλγόριθμος που να το επιλύει σε αποδεκτό χρόνο, δηλαδή να δίνει την βέλτιστη λύση. Έτσι, καταφεύγουμε σε άλλες μεθόδους, οι οποίες μπορεί να μην δίνουν την βέλτιστη λύση, αλλά μια σχεδόν βέλτιστη λύση σε αποδεκτό χρόνο επίλυσης. Βέλτιστη λύση θεωρείται εκείνη που ελαχιστοποιεί ή μεγιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση, ενώ ικανοποιεί τους περιορισμούς του προβλήματος (Καρλαύτης και Λαγαρός, 2010). Οι περιορισμοί μπορούν να διαχωριστούν σε ανελαστικούς (hard constraints) και ελαστικούς (soft constraints). Οι ανελαστικοί περιορισμοί δεν πρέπει να παραβιαστούν υπό οποιεσδήποτε συνθήκες. Οι λύσεις που ικανοποιούν αυτούς τους περιορισμούς ονομάζονται εφικτές (feasible solutions). Είναι επιθυμητό να ικανοποιηθούν όσο το δυνατόν περισσότεροι ελαστικοί περιορισμοί, αλλά αν κάποιος παραβιαστεί, εφαρμόζεται μία ποινή (penalty function) και η λύση θεωρείται ακόμα εφικτή. Όσο περισσότερους ελαστικούς περιορισμούς ικανοποιεί μια λύση, τόσο πιο αποδοτική (efficient) θεωρείται. Ως βέλτιστη λύση, λοιπόν, ορίζεται η εφικτή λύση η οποία ικανοποιεί το μέγιστο δυνατό υποσύνολο των ελαστικών περιορισμών (Griva et al, 2009).

2.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Τα προβλήματα σχεδιασμού δικτύων έχουν μελετηθεί εκτενώς. Ειδικά για τα προβλήματα που αφορούν δίκτυα τηλεπικοινωνιών ή εμπορευματικών μεταφορών έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμοι επιτυχείς αλγόριθμοι. Χρησιμοποιούνται μέθοδοι που βασίζονται στο γραμμικό προγραμματισμό, στη χαλάρωση κατά Lagrange (Lagrangian relaxation), στην αποσύνθεση κατά Bender (Bender's decomposition), συχνά σε συνδυασμό με τη μέθοδο κλάδου και φράγματος (branch-and-bound) (Magnanti et al. 1986; Magnanti et al. 1995; Holmberg and Yuan 2000; Holmberg and Hellstrand 1998; Sridhar and Park 2000). Μια λεπτομερέστερη επισκόπηση των διαφόρων εφαρμογών γίνεται από τους Magnanti and Wong (1984) και Minoux (1989).

Αντιθέτως, η δημοσιευμένη βιβλιογραφία για το σχεδιασμό δικτύου αερομεταφορών είναι ελάχιστη, ενώ δεν γνωρίζουμε κάποια εργασία σχετική με σχεδιασμό δικτύου υδροπλάνων.

Συνεπώς, σε αυτή την ενότητα γίνεται ανασκόπηση κάποιων από τα κυριότερα μοντέλα δικτύων αερομεταφορών που έχουν αναπτυχθεί στη βιβλιογραφία. Διακρίνονται δύο μεγάλες κατηγορίες προβλημάτων (Bell and Iida, 1997):

i. Τα στατικά ή ντετερμινιστικά μοντέλα, όπου τα δεδομένα εισόδου θεωρούνται σταθερές και γνωστές ποσότητες
ii. Τα στοχαστικά μοντέλα που θεωρούν κάποια από τα δεδομένα εισόδου ως τυχαίες μεταβλητές και, άρα, εμπεριέχουν κάποιο βαθμό αβεβαιότητας

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι αντικειμενικές συναρτήσεις σε συνδυασμό με τους περιορισμούς του κάθε προβλήματος, η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση καθώς και τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από κάθε μελέτη.

2.3.1 Στατικά μοντέλα

2.3.1.1 Συνδυασμένη βελτιστοποίηση συστήματος δικτύου- χρήστη

Ο Chan (1974) ασχολείται με το γενικότερο πρόβλημα του δικτύου μεταφορών που περιλαμβάνει τη σύνθεση, την ανάλυση και τη βελτίωση. Ο συγγραφέας διατυπώνει το πρόβλημα της δόμησης των διαδρομών του δικτύου μιας αεροπορικής εταιρείας ως παράδειγμα και το επιλύει μέσω της μεθόδου των διαδοχικών προσεγγίσεων (successive approximation). Επινοεί έναν αλγόριθμο απαρίθμησης που καλείται RISE (Route Improvement, Synthesis and Evaluation) και συνθέτει και αξιολογεί διαδρομές με βάση ένα έξυπνα σχεδιασμένο διάγραμμα χρόνου-χώρου. Ισχύουν τα εξής:

(i.) Η υπόθεση της επιβατικής ροής είναι βέλτιστη για το σύστημα (ρυθμιστική) ως προς την αεροπορική εταιρεία και βέλτιστη για το χρήστη (περιγραφική) ως προς τους επιβάτες την ίδια στιγμή
(ii.) Η ζήτηση ανταποκρίνεται στο επίπεδο-παροχής υπηρεσιών, δηλαδή λιγότεροι επιβάτες θα ζητούν μεταφορική εξυπηρέτηση όπου η εξυπηρέτηση δεν είναι ικανοποιητική και αντίστροφα

Ο αλγόριθμος αποτελείται από δύο φάσεις: την πρώτη όπου εντοπίζεται μια αρχική εφικτή λύση και τη δεύτερη όπου μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας επιτυγχάνεται η βέλτιστη λύση. Η αντικειμενική συνάρτηση επιδιώκει να μεγιστοποιήσει το κέρδος, που είναι η διαφορά μεταξύ εσόδων U και του κόστους V:

max $\{l(R,F) = U(R) - V(R,F)\}$

subject to:

$$\sum_{m=0}^{m_0} b_{pq}^{m} \geq 1 \quad (2.1)$$

$$\sum_{m_0}^{m-1} b_{pq}^{m} = 0 \quad (2.2)$$

όπου:

R η δομή των διαδρομών

F η συχνότητα των διαδρομών

b_{pq}^{m} δυαδική μεταβλητή που παίρνει την τιμή 1 όταν το ζευγάρι των πόλεων pq καλύπτεται από μία διαδρομή m στάσεων, 0 αλλιώς

Οι περιορισμοί (1) και (2) χρησιμοποιούνται για τον τερματισμό της επαναληπτικής διαδικασίας με την επιβολή ποινής $_{pq}w^{m} = -\infty$ (άπειρο κόστος) στο σημείο b_{pq}^{m} του διαγράμματος. Ο πρώτος περιορισμός ορίζει ότι το ζεύγος των πόλεων pq πρέπει να εξυπηρετείται από μια διαδρομή m στάσεων την καλύτερη και ο δεύτερος ότι το ζεύγος αυτό δεν καλύπτεται από οποιαδήποτε διαδρομή με (m-1) στάσεις. Το κόστος για μια διαδρομή υπολογίζεται λαμβάνοντας το γινόμενο της συχνότητας διαδρομής $^{m}n^{a}{}_{r}$ (για τη διαδρομή r, m στάσεων που πραγματοποιείται από ένα αεροσκάφος a),η οποία υπολογίζεται αρχικά ώστε να επαρκεί για το τμήμα με τη μεγαλύτερη επιβατική κίνηση, του αριθμού των ωρών μπλοκ στη διαδρομή $^{m}t^{a}{}_{r}$ και το κόστος c_a ανά ώρα για το αεροσκάφος a.

$$_{pq}{}^{a}v^{m} = c_{a*}\,{}^{m}t^{a}{}_{r*}\,{}^{m}n^{a}{}_{r} \quad (2.3)$$

Δεδομένου ότι η διαθεσιμότητα του στόλου δε θεωρείται περιοριστικός παράγοντας, ο τύπος αεροσκάφους με το λιγότερο κόστος και την κατάλληλη εμβέλεια θα επιλεγεί για τη διαδρομή, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί το κέρδος του συστήματος.

Ο αλγόριθμος, που αποτελεί ένα υβρίδιο αναλυτικών και προσεγγιστικών μεθόδων, εφαρμόστηκε σε πραγματικά δεδομένα της American Airlines με ενθαρρυντικά αποτελέσματα, μειώνοντας το κόστος και τους υπολογιστικούς χρόνους.

Οι Yan και Tseng (2002) αναπτύσσουν ένα μοντέλο δικτύου σε συνδυασμό με έναν αλγόριθμο για την επίλυσή του, που αντιμετωπίζει απευθείας, χωρίς τη δημιουργία ενδιάμεσου χρονοδιαγράμματος, το ζήτημα της αλληλεξάρτησης της ζήτησης και της προσφοράς πτήσεων. Με τη χρήση διαγραμμάτων δικτύου χώρου-χρόνου κατασκευάστηκε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο δρομολόγησης του στόλου και προγραμματισμού των πτήσεων με στόχο τη μεγιστοποίηση των κερδών των μεταφορέων. Μαθηματικά το πρόβλημα διατυπώνεται ως εξής:

Minimize

$$Z=\sum_{m\in M}\sum_{ij\in Am} C_{ij}^{m} X_{ij}^{m} + \sum_{n\in N}\sum_{ij\in Bn} T_{ij}^{n} Y_{ij}^{n} \tag{2.4}$$

$$\sum_{j\in NFm} X_{ij}^{m} - \sum_{k\in NFm} X_{ki}^{m} = 0, \qquad \forall i\in N\,Fm,\ \forall m\in M \tag{2.5}$$

$$\sum_{j\in NFm} Y_{ij}^{n} - \sum_{k\in NFm} Y_{ki}^{n} = 0, \qquad \forall i\in N\,Pn,\ \forall n\in N \tag{2.6}$$

$$\sum_{m\in M} X_{ij}^{m} \le AFm, \qquad \forall m\in M \tag{2.7}$$

$$\sum_{m\in M} X_{ij}^{m} \le 1, \qquad \forall ij\in F\,F \tag{2.8}$$

$$\sum_{m\in M} \sum_{ij\in S} X_{ij}^{m} \le Q^{a} \tag{2.9}$$

$$\sum_{n\in N} Y_{ij}^{n} \le \sum_{m\in M} K^{m} X_{ij}^{m}, \qquad \forall ij\in F\,F \tag{2.10}$$

$$0\le X_{ij}^{m} \le U_{ij}^{m}, \qquad \forall ij\in Am,\ m\in M \tag{2.11}$$

$$0\le Y_{ij}^{n} \le U_{ij}^{n}, \qquad \forall ij\in Bn,\ n\in N \tag{2.12}$$

$$X_{ij}^{m} \in \text{Integer} \qquad \forall ij\in Am,\ m\in M \tag{2.13}$$

$$Y_{ij}^{n} \in \text{Integer} \qquad \forall ij\in Bn,\ n\in N \tag{2.14}$$

όπου:

X_{ij}^{m} η ροή στο τόξο ij στο δίκτυο του m-οστού στόλου

Y_{ij}^{n} η ροή στο τόξο ij στο δίκτυο με n επιβάτες

C_{ij}^{m} το κόστος του τόξου ij στο δίκτυο του m-οστού στόλου

T_{ij}^{n} το κόστος του τόξου ij στο δίκτυο με n επιβάτες

m: ο m- οστός στόλος

M: το σύνολο όλων των στόλων

n: το n-οστό ζευγάρι ΠΠ

N: το σύνολο όλων των ΠΠ

A_m: το σύνολο όλων των τόξων στο δίκτυο του m-οστού στόλου

B_n: το σύνολο όλων των τόξων στην νιοστή δίκτυο με n επιβάτες

NF_m: το σύνολο όλων των κόμβων στο δίκτυο του m-οστού στόλου

NP_n: το σύνολο όλων των κόμβων στο δίκτυο με n επιβάτες

CF_m: το σύνολο όλων των κυκλικών τόξων στο δίκτυο του m-οστού στόλου

AF_m: ο αριθμός των διαθέσιμων αεροπλάνων στο δίκτυο του m-οστού στόλο

FF: το σύνολο όλων των τόξων πτήσης (για όλους τους τύπους στόλου)

S^a: το σύνολο των τόξων κατά την πτήση στον a- οστό σταθμό

Q^a: το επιτρεπόμενο ποσοστό πτήσεων στον a-οστό σταθμό

SA: το σύνολο όλων των σταθμών

K^m: η χωρητικότητα του αεροσκάφος του m-οστού στόλου (θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στο στάδιο του σχεδιασμού ένας συντελεστής πληρότητας)

U_{ij}^m : το ανώτερο όριο της ροής του τόξου (i, j) στο δίκτυο του m-οστού στόλου

U_{ij}^n : το ανώτερο όριο της ροής του τόξου (i, j) στο δίκτυο με n επιβάτες

Το μοντέλο διαμορφώνεται ως ακέραιο πρόβλημα πολλαπλών ροών (IMCFP) με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους. Οι περιορισμοί (2.5) και (2.6) διασφαλίζουν τη διατήρηση της ροής σε κάθε κόμβο, ενώ ο (2.7) δηλώνει ότι ο αριθμός των αεροσκαφών που χρησιμοποιείται δε πρέπει να ξεπερνά το μέγεθος του στόλου. Η εξίσωση (2.8) ορίζει ότι κάθε πτήση εξυπηρετείται το πολύ μία φορά, η εξίσωση (2.9) εξασφαλίζει ότι το άθροισμα όλων των πτήσεων σε κάθε σταθμό δεν υπερβαίνει τις επιτρεπόμενες, η εξίσωση (2.10) διασφαλίζει ότι ο όγκος των επιβατών είναι εντός της χωρητικότητας του αεροσκάφους. Οι εξισώσεις (2.11) και (2.12) διατηρούν τις ροές των τόξων μέσα στα όρια τους και οι εξισώσεις (2.13) και (2.14) εξασφαλίζουν ότι οι ροές των αεροπλάνων και των επιβατών είναι ακέραιοι αριθμοί.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση βασίζεται κυρίως στη εφαρμογή της μεθόδου χαλάρωσης κατά Lagrange (Lagrangian relaxation), τη μέθοδο simplex, μια τροποποιημένη μέθοδο υπό-κλίσης (sub-gradient method), τον αλγόριθμο ελάχιστου κόστους και μια προσεγγιστική μέθοδο για το άνω όριο, ενώ ένας αλγόριθμος αποσύνθεσης ροής (flow decomposition algorithm) χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό του δρομολογίου κάθε αεροσκάφους. Το μοντέλο εφαρμόστηκε σε πραγματικά δεδομένα των εσωτερικών πτήσεων μιας μεγάλης αεροπορικής εταιρείας στην Ταϋλάνδη, έχοντας ενθαρρυντικά αποτελέσματα που υποδεικνύουν ότι με κατάλληλες τροποποιήσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλα συστήματα μεταφοράς.

2.3.1.2 Ολοκληρωμένη αντιμετώπιση της βελτιστοποίησης δικτύου

Οι Taylor και de Weck (2006) εστιάζουν, επίσης, στην ταυτόχρονη βελτιστοποίηση των αποφάσεων σχετικά με τα οχήματα και με τη λειτουργία του δικτύου, σχεδιάζοντας ένα δίκτυο αερομεταφορών για παραδόσεις δεμάτων. Στην εργασία αυτή, μελετάται η ταυτόχρονη σχεδίαση ενός στόλου αεροσκαφών και του δικτύου μεταφοράς, όπου το δίκτυο ορίζεται από ένα σύνολο πόλεων, και τα τόξα που συνδέουν τις πόλεις είναι οι αποστάσεις σε ευθεία γραμμή ανάμεσα σε κάθε ζεύγος πόλεων. Κάθε ζεύγος πόλεων έχει μια συγκεκριμένη ζήτηση για δέματα που είναι σταθερή, ενώ η ζήτηση μεταξύ των δύο πόλεων θεωρείται ότι είναι συμμετρική, δηλαδή όσα δέματα πρέπει να μεταφερθούν από την πόλη i στην πόλη j, τόσα πρέπει να μεταφερθούν από την πόλη j στην πόλη i ($P_{ij} = P_{ji}$). Ο στόχος του προβλήματος είναι να προσδιοριστεί η χαμηλότερου κόστους αρχιτεκτονική του συστήματος μεταφοράς που να ικανοποιεί τη δεδομένη ζήτηση. Το ολοκληρωμένο πρόβλημα σχεδιασμού συστήματος μεταφοράς αποτελείται από τέσσερα στοιχεία: τον ορισμό του δικτύου μεταφοράς, το σχεδιασμό των οχημάτων, τους λειτουργικούς περιορισμούς, και το στόχο σε επίπεδο συστήματος. Το όχημα και το δίκτυο είναι τα υποσυστήματα που καθορίζουν το κόστος του συστήματος μεταφοράς, ενώ οι λειτουργίες καθορίζουν τους περιορισμούς .Μαθηματικά το πρόβλημα διατυπώνεται ως εξής:

Για το μοντέλο του δικτύου:

$$\sum_{\kappa=1}^{N} x_{ijk} = P_{ij} \quad i, j = 1 \ldots N \tag{2.15}$$

όπου:

P_{ij} η ζήτηση δεμάτων από την πόλη i στην πόλη j και N ο συνολικός αριθμός πόλεων

Για το μοντέλο των αεροσκαφών επιλύεται το σύστημα

$$\begin{cases} W_0 = \frac{W_p}{1 - f_f - s_f} \\ s_f = 1.02\, W_0^{-0.06} \end{cases} \tag{2.16 - 2.17}$$

Από όπου υπολογίζεται το συνολικό βάρος του αεροσκάφους W_0 και το βάρος των καυσίμων, όπου:

f_f το κλάσμα του βάρους των καυσίμων

s_f το κλάσμα του βάρους του σκελετού του αεροσκάφους

W_p το ωφέλιμο φορτίο του αεροσκάφους

Για τους λειτουργικούς περιορισμούς:

$$G_{ik} = n_{ik}C \quad (2.18)$$

με:

$$\sum_{j=1}^{N} x_{ijk} \leq G_{ik} \qquad \text{i,k=1….N} \quad (2.19)$$

$$\sum_{i=1}^{N} x_{ijk} \leq G_{ik} \qquad \text{j,k=1….N} \quad (2.20)$$

όπου:

C η χωρητικότητα του αεροσκάφους σε δέματα

G_{ik} η χωρητικότητα της διαδρομής i,k σε δέματα

n_{ik} ο αριθμός των αεροσκαφών στη διαδρομή i,k

Για το αντικείμενο του συστήματος:

$$\min \ J = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} c_{ik} n_{ik} \quad (2.21)$$

όπου:

c_{ik} το κόστος ενός αεροσκάφους που ταξιδεύει σε μια δεδομένη διαδρομή και δίνεται ως εξής:

$$c_{ik} = \begin{cases} f + m2\frac{d_{ik}}{V_c} & , \quad r \geq d_{ik}, i \neq k \\ \infty & , \quad r < d_{ik}, i \neq k \\ 0 & , \quad i = k \end{cases} \quad (2.22)$$

όπου:

m το μεταβλητό κόστος

f το σταθερό κόστος

V_c η ταχύτητα του αεροσκάφους

d_{ik} η απόσταση μεταξύ των πόλεων i, k

r η εμβέλεια του αεροσκάφους

Οι μελετητές εφάρμοσαν το μοντέλο σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις, που η καθεμία περιλάμβανε επτά πόλεις, χρησιμοποιώντας για την επίλυση τη μέθοδο της προσομοίωσης ανόπτησης (simulated annealing). Έπειτα, συνέκριναν τα αποτελέσματα με εκείνα της βελτιστοποίησης μόνο του συστήματος των οχημάτων ή μόνο του δικτύου και παρατήρησαν ότι η συνδυαστική βελτιστοποίηση όλων των παραμέτρων του συστήματος πέτυχε μια μείωση του συνολικού κόστους κατ' ελάχιστο 10% σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους.

2.3.1.3 Το δίκτυο hub and spoke

Ένα δίκτυο «πλήμνης και ακτίνας» (hub and spoke) περιλαμβάνει κέντρα, που είναι σημεία παράδοσης και παραλαβής και κόμβους, που αποτελούν σημεία μετεπιβιβάσεων /μεταφορτώσεων. Οι ακτινικές διαδρομές συνδέουν τα κέντρα με τους κόμβους, ενώ ορίζονται και διαδρομές μεταξύ των κόμβων. Οι τελευταίες θεωρούνται ως πρωτεύουσες διαδρομές, ενώ οι ακτινικές ως δευτερεύουσες. Τα κέντρα παραλαβής και παράδοσης θεωρούνται σημεία προέλευσης και προορισμού, αντίστοιχα.

Οι Jaillet et al. (1996) εισάγουν μοντέλα με βάση τη ροή των επιβατών για το σχεδιασμό του μεταφορικού δικτύου και τη δημιουργία των πολιτικών δρομολόγησης των οχημάτων. Η προσέγγισή τους διαφέρει από προγενέστερες προτάσεις για το σχεδιασμό των δικτύων αερομεταφορών καθώς δεν υιοθετείται εξαρχής η δομή hub and spoke αλλά χρησιμοποιούνται ενδιάμεσοι σταθμοί μόνο όταν είναι οικονομικά συμφέρουσα η επιλογή αυτή. Επίσης, τα μοντέλα εντοπίζουν τον αριθμό των επιβατών σε κάθε πτήση και περιλαμβάνουν την επιλογή μεταξύ διαφορετικών τύπων αεροσκαφών, ενώ επιτρέπουν την κατανομή της ζήτησης σε διαφορετικές διαδρομές μεταξύ ενός ζεύγους προέλευσης προορισμού. Το πρόβλημα διατυπώνεται ως πρόβλημα μεικτού ακέραιου προγραμματισμού (MIP) για πτήσεις με μία, δύο ή περισσότερες ενδιάμεσες στάσεις. Χωρίς περιορισμό στον αριθμό των στάσεων η μαθηματική διατύπωση είναι η εξής:

$$\min \sum_{i\neq j} \sum_{k\in K} d_{ij} c_k y_{ij}^k \tag{2.23}$$

subject to:

$$\sum_{j\neq i} z_{ij}^d - \sum_{j\neq i} z_{ij}^d = \begin{cases} f_d & if\ i=0 \\ -f_d & if\ i=0 \quad για\ όλα\ τα\ i \\ 0 & αλλιώς \end{cases} \tag{2.24}$$

$$\sum_{d\in D} z_{ij}^d \leq \sum_{k\in K} b_k y_{ij}^k \quad για\ όλα\ τα\ i\neq j \tag{2.25}$$

$z_{ij}^d \geq 0$ για όλα τα i,j,d $\neq D$

$y_{ij}^k \geq 0$ και ακέραιος για όλα τα i≠j, k∈K

όπου:

d_{ij}=d_{ji} η απόσταση από την πόλη i στην πόλη j

c_k το κόστος ανά μίλι του αεροσκάφους τύπου κ

y_{ij}^k ο αριθμός των αεροσκαφών τύπου κ που κινούνται στη διαδρομή από την πόλη i στην πόλη j

b_k η χωρητικότητα του αεροσκάφους τύπου κ

z_{ij}^d το κλάσμα της ροής των επιβατών f_d που χρησιμοποιεί τη διαδρομή (i , j)

Ο περιορισμός (2.24) διασφαλίζει τη διατήρηση της ροής , ενώ ο (2.25) την ικανότητα των διαδρομών.

Για την επίλυση αναπτύχθηκε μια προσεγγιστική μέθοδος που δοκιμάστηκε σε δύο διαφορετικά σετ δεδομένων και αποδείχτηκε ότι δίνει εξαιρετικά αποτελέσματα όταν τα μητρώα προέλευσης προορισμού περιλαμβάνουν στοιχεία με ικανοποιητικό μέγεθος ($f_d \geq 20$). Ένα από τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν είναι το γεγονός πως οι πιθανοί κόμβοι (hubs) του δικτύου εξαρτώνται περισσότερο από τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά του, παρά από την κατανομή της ζήτησης. Τέλος, η πολιτική της μίας ενδιάμεσης στάσης αποδεικνύεται προτιμότερη, ενώ η χρήση μεικτού στόλου αεροσκαφών δε φαίνεται ιδιαίτερα ευνοϊκή σε ένα ήδη αποτελεσματικό δίκτυο.

Οι Lin και Chen (2008) προτείνουν ένα γενικευμένο δίκτυο hub and spoke που ενσωματώνει τις λειτουργίες τριών κοινών κομβικών δικτύων: του αμιγούς, εκείνου με ενδιάμεση στάση και του κεντρικά κατευθυνόμενου, με την ανάπτυξη ενός αλγόριθμου έμμεσης απαρίθμησης πολλαπλών ροών με περιορισμούς (IMCFP). Ο αλγόριθμος δοκιμάστηκε στο δίκτυο αερομεταφορών AsiaOne της Fedex, αποδεικνύοντας ότι η δομή του γενικευμένου δικτύου παρείχε ευελιξία στον καθορισμό του πιο οικονομικά αποδοτικού λειτουργικού σχεδίου μέσω της χρήσης των κομβικών σταθμών. Μαθηματικά το πρόβλημα διατυπώνεται ως εξής:

$$\min \psi(h,x) = \sum_k \sum_p C_p^k h_p^k + \sum_m Q^m \left[\sum_{i,j \in A}(C_i + C_{ij})x_{ij}^m + C^{m_d}\right] \qquad (2.26)$$

όπου:

C_p^k το λειτουργικό κόστος για ένα όχημα τύπου k στη διαδρομή p

h_p^k ο αριθμός των κόμβων για ένα όχημα τύπου k στη διαδρομή p, h ∈ H

$\left[\sum_{i,j \in A}(C_i + C_{ij})x_{ij}^m + C^{m_d}\right]$ το κόστος μεταφοράς και διαχείρισης μιας μονάδας για ένα ζεύγος προέλευσης προορισμού m στη διαδρομή $x_{ij}^m = 1$

Q^m η ζήτηση για κάθε ζεύγος προέλευσης προορισμού m ∈ M

subject to:

$$\sum_i x_{ij}^m - \sum_i x_{ji}^m = \begin{cases} 1; & j = m_d \\ -1 & j = m_o \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad \forall j \in \mathrm{N}, \mathrm{m} \in \mathrm{M} \tag{2.27}$$

$$\sum_i \sum_{m_d} Q^{m_o m_d} x_{m_o j}^{m_o m_d} \le \mathrm{V_{m_o}} \quad \forall_{m_o} \in 0 \tag{2.28}$$

$$\sum_{i:ij \in A} \sum_m \boldsymbol{Q^m x_{ij}^m} \le \boldsymbol{\hat{V}_J \forall j \in N \setminus O} \tag{2.29}$$

$$\sum_m Q^m x_{ij}^m \le \sum_k \hat{V}^k \left(\sum_p \delta_{ij.p}^k h_p^k\right) \quad \boldsymbol{\forall ij \in A} \tag{2.30}$$

$$\sum_J \sum_p \delta_{ji.p}^k \boldsymbol{.h_p^k} - \sum_j \sum_p \delta_{ij.p}^k \boldsymbol{.h_p^k} = 0 \ \boldsymbol{\forall i \in N, k \in K} \tag{2.31}$$

$$\boldsymbol{X_{IJ}^m, h_P^k} \in \{0{,}1\} \quad \boldsymbol{\forall ij \in A, m \in M, p \in P, k \in K} \tag{2.32}$$

$$\sum_{ij} \left(t_i + t_{ij}\right) x_{ij}^m + \boldsymbol{t_{m_d}} \le \boldsymbol{T^m \ \forall m \in M} \tag{2.33}$$

$$\sum_i \boldsymbol{Z_{ij}^{md}} \le 1 \quad \boldsymbol{\forall i \in N \setminus D, \forall m_d \in D} \tag{2.34}$$

$$Bz_{ij}^{m_d} - \sum_{m_o} x_{ij}^{m_o.m_d} \ge 0 \quad \boldsymbol{\forall ij \in A, \forall M m_d \in D} \tag{2.35}$$

$$\sum_J \sum_k \sum_p \delta_{ij.p}^k \boldsymbol{h_{p(h)}^k} \le 1 \quad \boldsymbol{\forall i \in N \setminus H} \tag{2.36}$$

$$\sum_i \sum_k \sum_p \delta_{ij.p}^k \boldsymbol{h_{h(p)}^k} \le 1 \ \boldsymbol{\forall j \in N \setminus H} \tag{2.37}$$

$$\sum_p \boldsymbol{h_p^k} \le \hat{H}^k \ \boldsymbol{\forall k \in K} \tag{2.38}$$

$$z_{ij}^{m_d} \in \{0{,}1\} \ \boldsymbol{\forall ij \in A \ \forall m_d \in D} \tag{2.39}$$

με μεταβλητές απόφασης:

$x_{ij}^m = 1$ αν το φορτίο του m-οστού ζεύγους ΠΠ χρησιμοποιεί το σύνδεσμο ij, 0 αλλιώς

$h_p^k(h_{p(h)}^k, h_{(h)p}^k) = 1$ αν ένα όχημα τύπου k κινείται στη διαδρομή p(ξεκινά και τερματίζει στον κόμβο h), 0 αλλιώς

$z_{ij}^{m_d} = 1$ αν j είναι ο εξερχόμενος κόμβος για τον προορισμό d στον κόμβο i, 0 αλλιώς

και παραμέτρους:

$\delta_{ij,p}^{k} = 1$ αν ο σύνδεσμος ij βρίσκεται στη διαδρομή p του οχήματος τύπου k, 0 αλλιώς

Η αντικειμενική συνάρτηση (2.26) ελαχιστοποιεί το άθροισμα του σταθερού κόστους και του κόστους μεταφοράς για τις διαδρομές των οχημάτων και του κόστος χειρισμού και μεταφοράς για διαδρομές εμπορευματικών μεταφορών. Ο περιορισμός (2.27) επιβάλλει τη διατήρηση της ροής. Όλα τα εμπορεύματα πρέπει να παραλαμβάνονται από την προέλευσή τους και να παραδίδονται στον προορισμό τους και όχι σε ενδιάμεσους κόμβους. Οι περιορισμοί (2.28) και (2.29) είναι οι περιορισμοί της παραγωγικής ικανότητας του κόμβου. Ο πρώτος περιορίζει όλους τους κόμβους προέλευσης, ενώ ο τελευταίος περιορίζει όλους τους άλλους κόμβους. Ο περιορισμός (2.30) εκφράζει τη σύζευξη των εμπορευματικών ροών και των διαδρομών των οχημάτων, που απαιτεί ότι το φορτίο δεν μπορεί παρά να κινείται στις διαδρομές των οχημάτων. Επιπλέον, χρησιμεύει ως περιορισμός των ικανοτήτων των συνδέσμων, ορίζει ,δηλαδή, ότι οι ροές φορτίου δεν πρέπει να υπερβαίνουν την ικανότητα του οχήματος που χρησιμοποιείται σε κάθε σύνδεσμο σε κάθε διαδρομή του οχήματος. Ο περιορισμός (2.31) δηλώνει ότι τα εισερχόμενα οχήματα θα πρέπει να είναι ίσα με τα εξερχόμενα οχήματα για όλες τις εγκαταστάσεις. Όλες οι μεταβλητές απόφασης, οι διαδρομές των οχημάτων και εμπορευμάτων είναι δυαδικές, δηλαδή με τιμή 1 ή 0 , όπως αναφέρεται στον περιορισμό (2.32). Οι παραπάνω αποτελούν ένα σύνολο κοινών περιορισμών που ισχύουν για σχεδόν όλες τις εφαρμογές (Current 1988; Bryan and O’Kelly 1999; Kim et al. 1999; Armacost et al. 2002).

Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν και άλλοι περιορισμοί που εμφανίζονται σε διάφορες εφαρμογές. Ο περιορισμός (2.33) επιβάλλει τις υποχρεώσεις παροχής υπηρεσιών (Lin 2001; Lin and Chen 2004). Η πορεία των εμπορευματικών μεταφορών από την αρχή μέχρι τον προορισμό για κάθε ζεύγος προέλευσης προορισμού πρέπει να πληροί το επίπεδο των υπηρεσιών. Ο περιορισμός (2.34) επιβάλλει ότι πρέπει να υπάρχει το πολύ ένας εξερχόμενος κόμβος για κάθε προορισμό. Ο περιορισμός (2.35) αναφέρει ότι πρέπει όλες οι μεταφορές φορτίων να μπορούν να δρομολογηθούν μέσω του εξερχόμενου κόμβου για τον προορισμό, εάν ανατεθεί. Η παράμετρος Β είναι ένας μεγάλος αριθμός, αυθαίρετα ορισμένος. Οι περιορισμοί (2.34) και (2.35) διασφαλίζουν από κοινού ότι πρέπει να υπάρχει ένα κατευθυνόμενο δέντρο σε κάθε προορισμό (Lin 2001). Οι περιορισμοί (2.36) και (2.37) είναι οι περιορισμοί μέγιστης σύνδεσης (Lin et al.

2003). Αυτοί, αντίστοιχα, αναφέρουν ότι υπάρχει το πολύ μια διαδρομή οχήματος που αναχωρεί (φθάνει) από (σε) ένα κέντρο προς (από) κάθε κόμβο. Ο περιορισμός (2.38) ορίζει ότι ο αριθμός των αεροσκαφών που χρησιμοποιούνται δεν πρέπει να ξεπερνά το μεγέθους του στόλου για κάθε τύπο αεροσκάφους. Τέλος, ο περιορισμός (2.39) ορίζει ότι μεταβλητές απόφασης (ένας εξερχόμενος κόμβος ανά προορισμό) είναι δυαδικές. Συμπερασματικά, οι περιορισμοί (2.33) - (2.39) είναι τυπικοί λειτουργικοί περιορισμοί για τα χρονικά καθορισμένα δίκτυα διακίνησης εμπορευμάτων.

Οι μελετητές προτείνουν μια ευρετική μέθοδο (heuristic) που αποφασίζει και ενσωματώνει μια χρονικά εφικτή διαδρομή ελάχιστου κόστους, θεωρώντας το κόστος των οχημάτων ως το βασικό παράγοντα κόστους. Το μοντέλο μπορεί να εφαρμοσθεί και για μεταφορές επιβατών με μικρές προσαρμογές.

2.3.2 Στοχαστικά μοντέλα

2.3.2.1 Προσέγγιση ασαφών συνόλων (Fuzzy theory)

Οι Teodorovic et al. (1994) αναπτύσσουν ένα μοντέλο για το σχεδιασμό ενός δικτύου αεροπορικής εταιρείας και τον καθορισμό των συχνοτήτων πτήσεων βασισμένο στη θεωρία των ασαφών συνόλων. Η ασαφής θεωρία των συνόλων (fuzzy set theory) είναι ένα εξαιρετικά βολικό μαθηματικό εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων που περιέχουν αβεβαιότητα, υποκειμενικότητα, ασάφεια και απροσδιοριστία.

Ορισμός του ασαφούς συνόλου (Zadeh, 1965):

Έστω X ένα μη μηδενικό σύνολο. Ένα ασαφές σύνολο A του X χαρακτηρίζεται από την συνάρτηση συμμετοχής του $A : X \rightarrow [0,1]$ όπου $A(x)$ είναι ο βαθμός συμμετοχής του στοιχείου $x \in X$ στο ασαφές σύνολο A.

Το πρώτο μέρος του μοντέλου χρησιμοποιεί το γενικευμένο αλγόριθμο Floyd και τη θεωρία της ασαφούς λογικής για να καθορίσει τις υποψήφιες διαδρομές, και το δεύτερο μέρος του μοντέλου βασίζεται στον ασαφή γραμμικό προγραμματισμό για τον προσδιορισμό των συχνοτήτων των πτήσεων για την υποψήφια διαδρομή. Το πρόβλημα μπορεί να ορισθεί ως εξής: Για δεδομένο εκτιμώμενο ετήσιο αριθμό των επιβατών μεταξύ των μεμονωμένων ζευγών των πόλεων, να καθορισθεί η δομή ενός δικτύου με απευθείας πτήσεις και πτήσεις με ενδιάμεσους σταθμούς και τις αντίστοιχες συχνότητες των πτήσεων. Στη συγκεκριμένη εργασία, αποφασίστηκε να επιλεχθούν οι υποψήφιες διαδρομές σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, οι συντομότερες διαδρομές επιλέγονται από το σύνολο όλων των πιθανών διαδρομών, δηλαδή για κάθε ζεύγος πόλεων μεταξύ των οποίων υπάρχει μεταφορική ζήτηση, οι k συντομότερες διαδρομές υπολογίζονται πρώτα με το γενικευμένο αλγόριθμο Floyd. Στο δεύτερο στάδιο, το σύνολο των υποψήφιων διαδρομών στενεύει ακόμη περισσότερο με την κατάταξή τους με βάση το μήκος και τον αριθμό των ενδιάμεσων στάσεων. Η κατάταξη αυτή γίνεται χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο που βασίζεται στις αρχές της λογική προσέγγισης (approximate reasoning). Εισάγεται ο δείκτης μήκους διαδρομής β_{rs} που ορίζεται ως:

$$\beta_{rs}=\frac{d_{rs}}{Drs} \tag{2.40}$$

όπου:

d_{rs} το μήκος της διαδρομής από την πόλη r στην πόλη s για μια απευθείας πτήση

Drs : το πραγματικό μήκος της υποψήφιας διαδρομής από την πόλη r στην πόλη s

Είναι σαφές ότι οι μικρότερες διαδρομές αντιστοιχούν στις μεγαλύτερες τιμές του δείκτη μήκους διαδρομής και αντιστρόφως. Υποτίθεται ότι ο δείκτης μήκους διαδρομής και ο συνολικός αριθμός των ενδιάμεσων στάσεων κατά μήκος της διαδρομής (n) είναι οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν την ισχύ της προτίμησής μας σχετικά με την επιλογή των επιμέρους διαδρομών. Η δύναμη της προτίμησης μας υποδεικνύεται από το δείκτη προτίμησης p που βρίσκεται εντός του διαστήματος [0,1]. Επιλέγονται για τη συνέχεια του μοντέλου οι διαδρομές με:

$$p_i \geq p^*$$

όπου:

p^* το αυθαίρετα ορισμένο όριο του δείκτη προτίμησης.

Η αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποιεί το κόστος του αερομεταφορέα και του χρόνου ταξιδιού των επιβατών, ενώ οι περιορισμοί αντανακλούν το επιθυμητό επίπεδο εξυπηρέτησης. Μαθηματικά το πρόβλημα διατυπώνεται ως εξής:

$$\text{Min } F=\sum_{a}(\alpha+\beta d_a)N_a+\sum_{a} hn\eta_\alpha N_a+\sum_{a} V_1 n\eta_\alpha N_a(\gamma+\rho d_a+L_a) \tag{2.41}$$

$$n\eta_\alpha N_a-\sum_{r}\sum_{s}\sum_{p}\delta_{a,p}^{r,s} f_{rsp}\geq 0, \qquad \forall\alpha \tag{2.42}$$

$$\sum_{p} f_{rsp}=f_{rs}, \qquad \forall\,(r,s) \qquad p\in P \tag{2.43}$$

$$N_a=\sum_{r}\sum_{s}\sum_{p}\delta_{a,p}^{r,s} N_{rsp}, \qquad \forall\alpha \tag{2.44}$$

$$\sum_{p} y_{rsp} N_{rspq} \geq L'_{rs}, \quad \forall (r,s) \qquad p \in P_{rs} \tag{2.45}$$

$$\sum_{p} N_{rsp} \geq L''_{rs}, \quad \forall (r,s) \qquad p \in P_{rs} \tag{2.46}$$

$$\text{All } N_a,\ N_{rsp}, f_{rsp} \geq 0 \tag{2.47}$$

όπου:

d_a το μήκος της διαδρομής σε μίλια

ft_{rspq} δηλώνει το χρόνο μπλοκ του τύπου αεροσκάφους q στη διαδρομή p μεταξύ της πόλης r και της πόλης s

A_q ο συνολικός αριθμός των αεροσκαφών τύπου q στο στόλο

u_q η μέγιστη δυνατή αξιοποίηση των αεροσκαφών τύπου q

N_{rspq} h εβδομαδιαία συχνότητα πτήσεων

f_{rspq} ο εβδομαδιαίος αριθμός επιβατών που μεταφέρονται από αεροσκάφη q από το r στο s κατά μήκος της διαδρομής p

f_a ο εβδομαδιαίος αριθμό των επιβατών στο σύνδεσμο a

h το διαχειριστικό κόστος ανά επιβάτη σε δολάρια

n_q ο αριθμός των διαθέσιμων θέσεων του αεροσκάφους τύπου q

η^*_{rspq} ένας κερδοφόρος συντελεστής πληρότητας

α,β σταθερές ανάλογα με τον τύπο του αεροσκάφους

γ,ρ συναρτήσεις του χρόνου ταξιδιού

$\delta_{a,p}^{r,s}$ η μεταβλητή δείκτης που παίρνει την τιμή 1 αν ο σύνδεσμος a ανήκει στη διαδρομή από το r στο s, 0 αλλιώς

L'_{rs} ο ελάχιστος αριθμός των απευθείας πτήσεων ανά έτος μεταξύ της πόλης r και της πόλης s

L''_{rs} ο ελάχιστος αριθμός των πτήσεων ανά έτος μεταξύ της πόλης r και της πόλης s

N_α οι συχνότητες των πτήσεων

Οι δύο πρώτοι όροι της εξίσωσης (2.41) εκφράζουν το συνολικό ετήσιο κόστος του αερομεταφορέα, ενώ ο τρίτος το κόστος που αντιστοιχεί στο χρόνο ταξιδιού των επιβατών. Με βάση τη σχέση (2.42), καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο προσφερόμενος αριθμός θέσεων σε κάθε σύνδεσμο πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσος με τον ετήσιο αριθμό των επιβατών σε όλες τις διαδρομές που περιέχουν αυτό το σύνδεσμο. Η σχέση (2.43) ορίζει την προϋπόθεση ότι το άθροισμα των επιβατών σε μεμονωμένες πτήσεις από κάποια πόλη r σε κάποια πόλη s ισούται με το συνολικό αριθμό των επιβατών που ταξιδεύουν μεταξύ των δύο αυτών πόλεων και πρέπει να πληρείται για όλα τα ζεύγη των πόλεων του δικτύου. Η σχέση (2.44) δείχνει ότι η συχνότητα πτήσεων για οποιαδήποτε σύνδεσμο ισούται με το άθροισμα των συχνοτήτων πτήσεων στις διαδρομές όπου ο σύνδεσμος περιλαμβάνεται. Η σχέση (2.45) καθορίζει τις ελάχιστες επιτρεπόμενες συχνότητες πτήσεων για απευθείας πτήσεις μεταξύ δυο οποιωνδήποτε πόλεων στο δίκτυο. Η σχέση (2.46) καθορίζει τις επιτρεπόμενες συχνότητες πτήσεων μεταξύ δύο πόλεων στο δίκτυο. Οι σχέσεις (2.45) και (2.46) διασφαλίζουν την απαραίτητη ποιότητα εξυπηρέτησης των επιβατών, καθώς για τους επιβάτες προτιμώνται οι διαδρομές χωρίς ενδιάμεσες στάσεις ως υψηλότερης ποιότητας. Η σχέση (2.47) απαιτεί όλες οι μεταβλητές να είναι μη αρνητικοί αριθμοί. Δεδομένου ότι οι σχέσεις (2.41) έως (2.47) προσδιορίζουν ετήσιες συχνότητες πτήσης, το μοντέλο δεν έχει ενσωματωμένους περιορισμούς που ορίζουν ότι οι συχνότητες πτήσεων πρέπει να είναι ακέραιες μεταβλητές.

Η εργασία αυτή αντιμετωπίζει τον εκτιμώμενο αριθμό των επιβατών μεταξύ των ζευγών πόλεων, καθώς και τα έξοδα λειτουργίας του μεταφορέα, ως ασαφείς αριθμούς (fuzzy numbers). Η ελάχιστη ετήσια συχνότητα των συνολικών και των απευθείας πτήσεων μεταξύ ζευγών των πόλεων είναι επίσης ασαφείς αριθμοί. Ένας ασαφής αριθμός A είναι ένα ασαφές σύνολο ορισμένο πάνω στους πραγματικούς αριθμούς με μια κανονική, κυρτή και συνεχή συνάρτηση συμμετοχής με πεπερασμένη υποστήριξη . Το πρόβλημα επιλύεται ως ασαφές πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού (LP) και διατυπώνεται ως εξής:

$$\sum_{a} (\alpha+\beta d_a)N_a + \sum_{a} hn\eta_\alpha N_a + \sum_{a} V_1 n\eta_\alpha N_a(\gamma+\rho d_a + L_a) \leq T-(2h-1)\delta_T \qquad (2.48)$$

$$n\eta_\alpha N_a - \sum_{r} \sum_{s} \sum_{p} \delta_{a,p}^{r,s} f_{rsp} \geq 0, \qquad \forall\alpha \qquad (2.49)$$

$$\sum_{p} f_{rsp} \leq (f_{rs})_{av} + (1-h)\delta_f, \qquad \forall (r,s) \qquad p\in P_{rs} \qquad (2.50)$$

$$\sum_{p} f_{rsp} \geq (f_{rs})_{av} + (1-h)\delta_f, \qquad \forall (r,s) \qquad p\in P_{rs} \qquad (2.51)$$

$$N_a = \sum_{r} \sum_{s} \sum_{p} \delta_{a,p}^{r,s} N_{rsp}, \qquad \forall\alpha \qquad (2.52)$$

$$\sum_{p} N_{rsp} \geq (L''_{rs})_{av} + (2h-1)\,\delta''_{L}\,, \quad \forall\,(r,s) \quad p \in P_{rs} \tag{2.53}$$

$$\sum_{p} y_{rsp}\, N_{rspq} \geq (L'_{rs})_{av} + (2h-1)\,\delta'_{L}, \quad \forall\,(r,s) \quad p \in P_{rs} \tag{2.54}$$

$$\text{All } N_a,\ N_{rsp},\ f_{rsp} \geq 0 \tag{2.55}$$

όπου:

h το επίπεδο ικανοποίησης που επιθυμούμε να μεγιστοποιήσουμε

Οι μελετητές εφάρμοσαν το μοντέλο σε υποθετικά αριθμητικά δεδομένα. Το εύρος των ασαφών αριθμών αντιστοιχεί σε υψηλότερο επίπεδο αβεβαιότητας σχετικά με τον αριθμό των επιβατών. Με άλλα λόγια, με την εφαρμογή του μοντέλου είναι δυνατό να ληφθούν διαφορετικές συχνότητες πτήσης, ανάλογα με το επίπεδο της αβεβαιότητας που υπάρχει στον εκτιμώμενο αριθμό των επιβατών.

2.3.2.2 Γκρι θεωρία (Grey theory)

Οι Hsu και Wen (2000) αναπτύσσουν μια σειρά από μοντέλα για την πρόβλεψη της επιβατικής κίνησης των αεροπορικών εταιρειών μεταξύ ζευγών πόλεων, το σχεδιασμό ενός δικτύου διαδρομών των αεροπορικών εταιρειών και τον προσδιορισμό των συχνοτήτων πτήσεων για μεμονωμένες διαδρομές με την εφαρμογή της θεωρίας Grey και του πολυκριτηριακού προγραμματισμού. Η θεωρία Grey, παρομοίως με τη θεωρία των ασαφών συνόλων, είναι μια αποτελεσματική μαθηματική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων που χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα και απροσδιοριστία και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της επιβατικής κίνησης των αεροπορικών εταιρειών όταν υπάρχει μικρό πλήθος δεδομένων. Στη συγκεκριμένη εργασία, τόσο οι ροές των επιβατών όσο και ο συνολικός χρόνος ταξιδιού θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές. Στη θεωρία Grey, οι τυχαίες μεταβλητές ορίζονται ως γκρι αριθμοί, και μία στοχαστική διαδικασία αναφέρεται ως γκρι διαδικασία. Ένα σύστημα γκρι ορίζεται ως ένα σύστημα που περιέχει πληροφορίες που παρουσιάζονται ως γκρι αριθμοί και μια γκρι απόφαση ορίζεται ως μια απόφαση που λαμβάνεται μέσα σε ένα γκρι σύστημα (J. Deng 1982; J. L. Deng 1989; Huang et al.1995).

Αρχικά, εφαρμόζεται ο αλγόριθμος Floyd για τον καθορισμό των υποψήφιων διαδρομών μεταξύ δύο πόλεων. Στη συνέχεια, οι υποψήφιες διαδρομές κατατάσσονται με βάση τρεις παραμέτρους: συνολικό μήκος, συνολικό αριθμό ενδιάμεσων στάσεων και το δείκτη συγκέντρωσης της ροής της εναέριας κυκλοφορίας. Ο τελευταίος ορίζεται ως το άθροισμα του ποσοστού συγκέντρωσης των αρχικών, ενδιάμεσων και κόμβων προορισμού κατά μήκος της υποψήφιας διαδρομής. Επομένως, τα κριτήρια για την επιλογή των υποψήφιων διαδρομών θα πρέπει να είναι μικρό μήκος διαδρομής, μεγάλος δείκτης συγκέντρωσης ροής και μικρός αριθμός των ενδιάμεσων στάσεων. Συνεπώς, ορίζεται ένα σύνολο κατηγοριών αποφάσεων B:

$$B=\{\chi\alpha\mu\eta\lambda\acute{\eta}(\kappa=1), \mu\varepsilon\sigma\alpha\acute{\iota}\alpha\ (\kappa=2), \upsilon\psi\eta\lambda\acute{\eta}\ (\kappa=3)\}$$

Οι υποψήφιες διαδρομές που κατατάσσονται στην κατηγορία «υψηλής απόφασης» (κ= 3) επιλέγονται για συμπεριληφθούν στο δίκτυο. Η μελέτη αυτή δεν καθορίζει μόνο τις συχνότητες πτήσεων για μεμονωμένες διαδρομές, αλλά επιλύει επίσης το πρόβλημα δρομολόγησης ενός δικτύου αεροπορικής εταιρείας με την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους του αερομεταφορέα και με την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους ταξιδιού των επιβατών. Εν προκειμένω, δημιουργείται ένα πρόβλημα προγραμματισμού με δύο αντικειμενικές συναρτήσεις για τον καθορισμό της συχνότητας των πτήσεων. Μαθηματικά το πρόβλημα διατυπώνεται ως εξής:

$$\text{Min } Z_1 = TC_a^c \tag{2.56}$$

$$\text{Min } Z_2 = TC_a^p \tag{2.57}$$

subject to:

$$\sum_r \sum_s \sum_p \sum_q \delta_{a,p}^{r,s} N_{rspq}\, \eta^*_{rspq}\, n_q - f_a \geq 0, \quad \forall \alpha \tag{2.58}$$

$$\sum_p \sum_q f_{rspq} = f_{rs} \qquad \forall\ (r,s) \qquad p \in P_{rs} \tag{2.59}$$

$$\sum_p \sum_q N_{rspq} = \sum_p \sum_q N_{srpq} \qquad \forall\ (r,s) \qquad p \in P_{rs} \tag{2.60}$$

$$\sum_r \sum_s \sum_p ft_{rspq}\ N_{rspq} \leq u_q * A_q * 7 \qquad \forall\ p \tag{2.61}$$

$$\sum_q N_{rspq} \geq L^o_{rs} \qquad p \in P^o_{rs} \tag{2.62}$$

$$\text{All } N_{rspq}, f_{rspq} \geq 0 \tag{2.63}$$

όπου:

TC_a^p το κόστος ταξιδιού των επιβατών στο σύνδεσμο a

TC_a^c το κόστος των αερομεταφορέων στο σύνδεσμο a

ft_{rspq} δηλώνει το χρόνο μπλοκ του τύπου αεροσκάφους q στη διαδρομή p μεταξύ της πόλης r και της πόλης s

A_q ο συνολικός αριθμός των αεροσκαφών τύπου q στο στόλο

u_q η μέγιστη δυνατή αξιοποίηση των αεροσκαφών τύπου q

N_{rspq} h εβδομαδιαία συχνότητα πτήσεων

f_{rspq} ο εβδομαδιαίος αριθμός επιβατών που μεταφέρονται από αεροσκάφη q από το r στο s κατά μήκος της διαδρομής p

f_a ο εβδομαδιαίος αριθμός των επιβατών στο σύνδεσμο a

n_q ο αριθμός των διαθέσιμων θέσεων του αεροσκάφους τύπου q

η^*_{rspq} ένας κερδοφόρος συντελεστής πληρότητας

L^o_{rs} ο ελάχιστος αριθμός των απευθείας πτήσεων ανά εβδομάδα μεταξύ της πόλης r και της πόλης s

P^o_{rs} το σύνολο των απευθείας δρομολογίων μεταξύ r κα s

$\delta^{r,s}_{a,p}$ η μεταβλητή δείκτης που παίρνει την τιμή 1 αν ο σύνδεσμος a ανήκει στη διαδρομή από το r στο s, 0 αλλιώς

Η εξίσωση (2.58) αντιπροσωπεύει ότι η μεταφορική ικανότητα που παρέχεται σε σχέση με τον αριθμό των θέσεων κάθε συνδέσμου πρέπει να είναι ίση ή μεγαλύτερη από τον αριθμό των επιβατών σε όλες τις γραμμές που περιέχουν το σύνδεσμο. Η εξίσωση (2.59) ορίζει ότι το άθροισμα των επιβατών που μεταφέρονται από ένα αεροσκάφος τύπου q κατά μήκος οποιασδήποτε διαδρομής p από το r στο s ισούται με τον συνολικό αριθμό των επιβατών που ταξιδεύουν μεταξύ αυτών των δύο πόλεων. Η εξίσωση (2.60) καθορίζει ότι σε κάθε αερολιμένα στο δίκτυο, κατά τη διάρκεια μιας ορισμένης χρονικής περιόδου συμβαίνουν τόσες απογειώσεις όσες και προσγειώσεις. Η εξίσωση (2.61) ορίζει ότι η συνολική χρήση των αεροσκαφών πρέπει να είναι ίση ή μικρότερη από τη μέγιστη δυνατή αξιοποίηση. Η εξίσωση (2.62) δείχνει ότι οι συχνότητες για ορισμένες απευθείας πτήσεις πρέπει να είναι ίσες ή μεγαλύτερες από μια ορισμένη ελάχιστη συχνότητα. Τέλος, η εξίσωση (2.63) περιορίζει όλες τις μεταβλητές να είναι μη αρνητικοί αριθμοί.

Από την επίλυση προκύπτει μια ομάδα βέλτιστων κατανομών συχνότητας για τις υποψήφιες διαδρομές, που παρέχουν σημαντική ευελιξία στο σχεδιασμό. Τα προτεινόμενα μοντέλα εφαρμόστηκαν σε ορισμένα διαθέσιμα στοιχεία από την China Airlines και αποδείχθηκαν πολύ πρακτικά για το σχεδιασμό αεροπορικών δικτύων.

2.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Βασικός σκοπός του κεφαλαίου αυτού ήταν η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με το σχεδιασμό δικτύων αερομεταφορών. Περιγράφηκαν τα πιο σημαντικά στατικά και πιθανοτικά μοντέλα που αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της δρομολόγησης αεροπλάνων, συχνά σε συνδυασμό με τον καθορισμό συχνοτήτων των γραμμών. Το ζήτημα της αβεβαιότητας στον αριθμό των επιβατών και στο χρόνο ταξιδιού αντιμετωπίζεται με τη χρήση στοχαστικών προσεγγίσεων, οδηγώντας στη δημιουργία μοντέλων που ανταποκρίνονται σε περισσότερο ρεαλιστικές συνθήκες.

Στην πλειοψηφία τους, οι αντικειμενικές συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση του κόστους του αερομεταφορέα, ενώ ορισμένες περιλαμβάνουν και το κόστος του επιβάτη. Τα αποτελέσματα δείχνουν, εν γένει, ότι οι προσεγγιστικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται αποδεικνύονται αποτελεσματικές και παρέχουν ευελιξία στο σχεδιασμό, καθώς μπορούν να εφαρμοστούν σε συστήματα φορτίων, αλλά και επιβατών. Ωστόσο, στην πλειοψηφία των εργασιών χρησιμοποιούνται συνδυασμοί δύο και περισσότερων μεθόδων, γεγονός που καθιστά εμφανή την έλλειψη εργασιών που αντιμετωπίζουν άμεσα και αποτελεσματικά το πρόβλημα του καθορισμού των διαδρομών, μέσω μιας απλούστερης διαδικασίας.

Στην συνέχεια, παρατίθεται πίνακας όπου παρουσιάζονται συνοπτικά στοιχεία για το κάθε πρόβλημα.

Πίνακας 1.1: Σύνοψη της βιβλιογραφίας

Μοντέλα	Συγγραφείς	Χρον/γία	Πρόβλημα	Μέθοδος επίλυσης	Στόχος Αντικειμενικής Συνάρτησης
Στατικά	Chan	1974	IMCFP	RISE (Προσεγγιστική/Αναλυτική Μέθοδος)	Μεγιστοποιεί το κέρδος του αερομεταφορέα
	Yan και Tseng	2002	IMCFP	Προσεγγιστική μέθοδος	Ελαχιστοποιεί το κόστος αερομεταφορέα και του χρήστη
	Taylor και de Weck	2006	IMCFP	Προσομοιωμένη Ανόπτηση (Simulated annealing)	Ελαχιστοποιεί το κόστος αερομεταφορέα και του χρήστη
	Jaillet et al.	1996	MIP	Προσεγγιστική μέθοδος	Ελαχιστοποιεί το κόστος του αερομεταφορέα
	Lin και Chen	2008	IMCFP	Προσεγγιστική μέθοδος	Ελαχιστοποιεί το κόστος του αερομεταφορέα
Στοχαστικά	Teodorovic et al	1993	Fuzzy LP	Fuzzy theory/γενικευμένος αλγόριθμος Floyd	Ελαχιστοποιεί το κόστος του αερομεταφορέα και του χρήστη
	Hsu και Wen	1999	NLP	Grey theory /αλγόριθμος Floyd	Ελαχιστοποιεί το κόστος του αερομεταφορέα και του χρήστη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3
ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην ενότητα αυτή θα αναφερθούμε σε δύο θεμελιώδη προβλήματα της μορφής δικτύου τα οποία έχουν μελετηθεί επαρκώς τις τελευταίες δεκαετίες: Το Πρόβλημα του Περιοδεύοντος Πωλητή (Traveling Salesman Problem) και το Πρόβλημα της Δρομολόγησης Οχημάτων (Vehicle Routing Problem). Συγκεκριμένα, θα παρουσιαστεί αναλυτικά το Πρόβλημα της Δρομολόγησης Οχημάτων με Ταυτόχρονη Παραλαβή και Διανομή (VRPSPD), που αποτελεί άλλωστε και το αντικείμενο αυτής της εργασίας. Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη ανασκόπηση των εργασιών που αντιμετωπίζουν το VRPSPD και διατυπώνεται μαθηματικά το μοντέλο για τη δρομολόγηση των υδροπλάνων. Τέλος, γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στους γενετικούς αλγόριθμους και αναπτύσσεται ο γενετικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται.

3.2 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΟΥ ΠΛΑΝΟΔΙΟΥ ΠΩΛΗΤΗ

Το γνωστότερο και πιο απλό πρόβλημα της επιχειρησιακής έρευνας στα δίκτυα διανομής είναι αυτό του Πλανόδιου Πωλητή (ΠΠΠ) - Traveling Salesman Problem (TSP). Το πρόβλημα αυτό συνίσταται στην εύρεση μίας μόνο διαδρομής που να συνδέει k πόλεις (κόμβους) με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται η συνολική διανυθείσα απόσταση. Κάθε σημείο πρέπει να δέχεται επίσκεψη μόνο μία φορά. Το πρόβλημα μπορεί να οριστεί ως εξής (Καρλαύτης και Λαγαρός, 2010):

Έστω n πόλεις (πελάτες) με γνωστό κόστος μετακίνησης c_{ij} από την πόλη i στην πόλη j. Ένας πωλητής (όχημα) ξεκινάει από μια πόλη (αρχικός κόμβος του δικτύου) κα σκοπός του είναι να επισκεφθεί κάθε πόλη του δικτύου μια και μόνο φορά. Ζητούμενο είναι να βρεθεί η βέλτιστη διαδρομή, δηλαδή η διαδρομή με το λιγότερο δυνατό συνολικό κόστος. Μαθηματικά το πρόβλημα διατυπώνεται ως εξής:

$$\min z = \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} c_{ijk} x_{ijk} \tag{3.1}$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = 1 \qquad \forall j \in N \tag{3.2}$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = 1 \qquad \forall i \in N \tag{3.3}$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in N|S} x_{ij} \geq 1 \qquad \forall S \subset N (S \neq \emptyset, S \neq N) \tag{3.4}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall i, j \in N \tag{3.5}$$

όπου:

z το συνολικό κόστος μετακίνησης

c_{ij} το κόστος μετακίνησης από την πόλη i στην πόλη j

$x_{ij} = 1$ αν ο σύνδεσμος ij βρίσκεται στη διαδρομή του πωλητή, 0 αλλιώς

N ο συνολικός αριθμός των πόλεων που αποτελούν το δίκτυο

$N = \{1,2,3........., n\}$

S μη κενό υποσύνολο του N, $S \neq N$

Η εξίσωση (3.2) περιορίζει τη ροή από μία πόλη i προς όλους τους υπόλοιπους προορισμούς σε μία μονάδα. Δηλαδή σε κάθε διαδρομή ο πωλητής θα πρέπει να φεύγει από την πόλη i του δικτύου μόνο μία φορά. Αντίστοιχα η εξίσωση (3.3) περιορίζει τη ροή προς μία πόλη j από όλους τους υπόλοιπους προορισμούς σε μία μονάδα, δηλαδή σε κάθε διαδρομή ο πωλητής θα πρέπει να εισέρχεται στην πόλη j του δικτύου μόνο μία φορά. Η εξίσωση (3.4) δείχνει ότι η διαδρομή που τελικά θα ακολουθηθεί πρέπει να περιλαμβάνει επίσκεψη σε κάθε πόλη ακριβώς μία φορά και η ροή να είναι συνεχόμενη. Μπορεί να εκφραστεί και ως εξής:

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1 \qquad \forall S \subset N (S \neq \emptyset, S \neq N),\ 2 \leq |N| \leq n \tag{3.6}$$

Οι εξισώσεις (4) και (6) διασφαλίζουν τη μη ύπαρξη «υπό-διαδρομών» (sub-tours) , διαδρομών δηλαδή που ξεκινούν και επιστρέφουν στον ίδιο κόμβο αλλά δεν περιλαμβάνουν όλες τις πόλεις.

Σημειώνουμε εδώ, ότι παρά την ιδιαίτερα απλή διατύπωσή του, το πρόβλημα είναι NP-δύσκολο, με αποτέλεσμα να είναι πρακτικά αδύνατη η αναλυτική επίλυση ακόμα και σε περιπτώσεις μικρών προβλημάτων. Αν αντιστοιχιστεί ένα μονοπάτι για κάθε ζευγάρι σημείων, ο συνολικός αριθμός δυνατών λύσεων για k σημεία είναι k!/2. Επομένως, όσο μεγαλώνει ο αριθμός των πόλεων η δυσκολία επίλυσης του προβλήματος αυξάνει υπέρμετρα. Για το λόγο αυτό η χρήση προσεγγιστικών μεθόδων αποτελεί τον πλέον κατάλληλο τρόπο για την επίλυση του προβλήματος.

3.3 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

3.3.1 Ορισμός και διατύπωση

Το πρόβλημα της δρομολόγησης οχημάτων μπορεί να θεωρηθεί ως μια πιο γενική, αλλά και ακόμα πιο δύσκολη ως προς την επίλυση, μορφή του Προβλήματος του Περιοδεύοντος Πωλητή (TSP) που περιγράφηκε προηγουμένως. Η διαφορά έγκειται στο ότι στην περίπτωση του VRP η δρομολόγηση αφορά στόλο πολλαπλών οχημάτων διανομών. Όπως και στην περίπτωση του TSP, έτσι και στο VRP κάθε πελάτης αποτελεί τον κόμβο ενός δικτύου. Υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί, οι σημαντικότεροι εκ των οποίων είναι οι ακόλουθοι:

- Κάθε όχημα έχει συγκεκριμένη μεταφορική ικανότητα – χωρητικότητα αγαθών και προϊόντων η οποία δε μπορεί να ξεπεραστεί.
- Κάθε όχημα έχει ένα προσδιορισμένο κόστος λειτουργίας (operating expense) το οποίο είναι δυνατόν και να διαφέρει από τα υπόλοιπα οχήματα του στόλου.
- Συχνά, συναντώνται και οι εξής περιορισμοί:
    - Κάθε πελάτης περιμένει να του παραδοθεί μία συγκεκριμένη ποσότητα αγαθών
    - Κάθε πελάτης πρέπει να εξυπηρετηθεί εντός συγκεκριμένων χρονικών διαστημάτων.
    - Κάθε πελάτης μπορεί να εξυπηρετηθεί από πολλά οχήματα για την εκτέλεση της παραγγελίας του.
    - Κάθε πελάτης έχει προτεραιότητα κατά την παράδοση (σε περίπτωση που το όχημα δεν προλαβαίνει να τους εξυπηρετήσει όλους)

Η μαθηματική διατύπωση της βασικής εκδοχής του προβλήματος με περιορισμό στη χωρητικότητα των οχημάτων έχει ως εξής:

$$\min \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} \sum_{k \in W} c_{ijk} x_{ijk} \tag{3.7}$$

$$\sum_{i \in C} \sum_{k \in W} x_{ijk} = 1 \qquad \forall j \in C \tag{3.8}$$

$$\sum_{j\in C}\sum_{k\in W} x_{ijk} = 1 \qquad \forall i \in C \tag{3.9}$$

$$\sum_{i\in C} x_{ipk} = \sum_{j\in C} x_{pjk} \qquad \forall p \in C, k \in W \tag{3.10}$$

$$\sum_{i\in C} d_i \left(\sum_{j\in C} x_{jk} \right) \le Q_k \quad \forall k \in W \tag{3.11}$$

$$\sum_{i\in C} s_{ik} \sum_{j\in C} x_{ijk} + \sum_{i\in C}\sum_{j\in C} t_{ijk} x_{ijk} \le T_k \qquad \forall k \in W \tag{3.12}$$

$$\sum_{j\in C/\{0\}} x_{0jk} \le 1 \quad \forall k \in W \tag{3.13}$$

$$\sum_{i\in C/\{0\}} x_{i0k} \le 1 \quad \forall k \in W \tag{3.14}$$

$$x_{ijk} \in S \qquad \forall i \in C, j \in C, k \in W \tag{3.15}$$

$$S = \{ x_{ijk} : \sum_{i\in B}\sum_{j\in B} x_{ijk} \le |B| - 1 \, for B \subseteq C/\{0\}; |B| \ge 2 \tag{3.16}$$

όπου:

c_{ijk} το κόστος που αντιστοιχεί στο τόξο ij

$x_{ijk}=1$ αν ο σύνδεσμος ij βρίσκεται στη διαδρομή του οχήματος k, 0 αλλιώς

C το σύνολο των κόμβων

W το σύνολο των υδροπλάνων

I,j,p κόμβοι που ανήκουν στο C

k όχημα που ανήκει στο W

d_i η ζήτηση για τον κόμβο i

c_{ij} το κόστος που αντιστοιχεί στο τόξο ij

Q_k η χωρητικότητα για το όχημα k

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.7) ελαχιστοποιεί το μεταφορικό κόστος. Οι περιορισμοί (3.8) και (3.9) διασφαλίζουν ότι κάθε κόμβος εξυπηρετείται ακριβώς από ένα υδροπλάνο. Ο περιορισμός (3.10) εξασφαλίζει ότι κάθε υδροπλάνο εξέρχεται από τον κόμβο στον οποίο εισήλθε, ενώ ο (3.11) είναι ο περιορισμός της χωρητικότητας του υδροπλάνου. Ο περιορισμός (3.12) ορίζει το μέγιστο επιτρεπόμενο χρόνο ταξιδιού. Ο σκοπός των περιορισμών (3.13) και

(3.14) είναι να διασφαλιστεί ότι δε γίνεται υπέρβαση του μέγιστου αριθμού οχημάτων. Οι περιορισμοί (3.15) και (3.16) είναι οι περιορισμοί εξάλειψης διαδρομών που δεν περιλαμβάνουν όλους τους κόμβους.

3.3.2 Παραλλαγές του Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων (VRP)

Το πρόβλημα της δρομολόγησης οχημάτων (vehicle routing problem-VRP) έχει μελετηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία σε διάφορες παραλλαγές του: με χρονικά περιθώρια, ομογενή ή ετερογενή στόλο, με ταυτόχρονη παράδοση και παραλαβή προϊόντων, συχνά σε διάφορους συνδυασμούς μεταξύ τους. Αρκετές τιμές έχουν πολλές φορές στοχαστικό χαρακτήρα, όπως για παράδειγμα ο αριθμός των πελατών, η μεταφορική ζήτηση και οι χρόνοι παράδοσης. Για μια πλήρη ανασκόπηση των διαφόρων εφαρμογών ο αναγνώστης παραπέμπεται στους Toth and Vigo και Golden et al (2008).

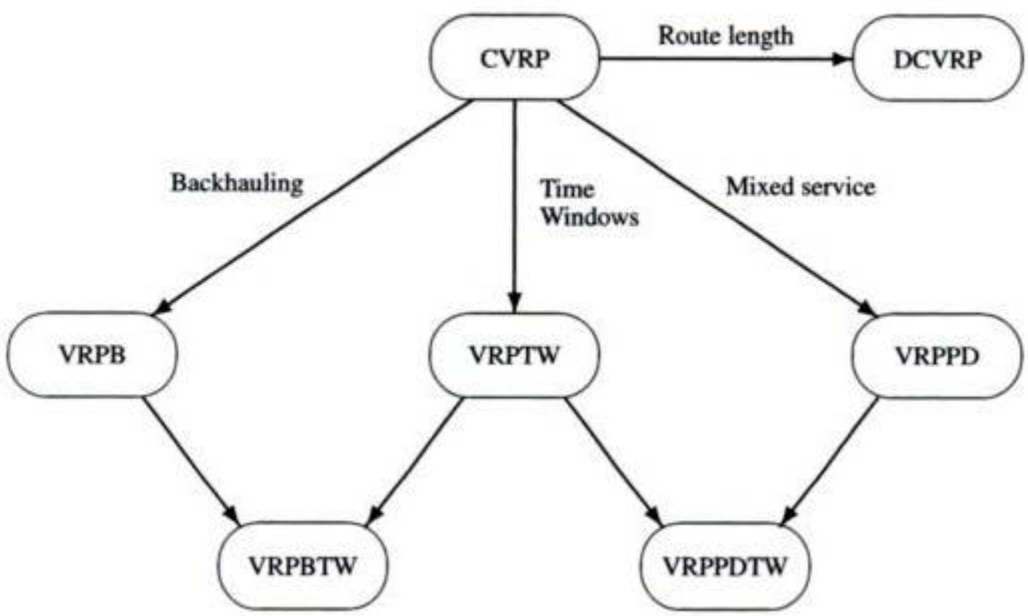
Οι κυριότερες παραλλαγές κατά τους Toth και Vigo (2002) είναι οι εξής:

- Το πρόβλημα της Δρομολόγησης Οχημάτων με περιορισμό στην Χωρητικότητα των Οχημάτων (Capacitated Vehicle Routing Problem CVRP)
- Το πρόβλημα της Δρομολόγησης Οχημάτων με περιορισμό στην Απόσταση που μπορούν να διανύσουν τα Οχήματα (Distance Constrained Vehicle Routing Problem-DCVRP)
- Το πρόβλημα της Δρομολόγησης Οχημάτων με περιορισμό στο Χρονικό Πλαίσιο Επίσκεψης των Πελατών – Χρονικά Παράθυρα. (Vehicle Routing Problem with Time Windows-VRPTW)
- Το πρόβλημα της Δρομολόγησης Οχημάτων με Παραλαβές. (Vehicle Routing Problem with Backhauls-VRPB)
- Το Πρόβλημα της Δρομολόγησης Οχημάτων με Παραλαβή και Διανομή Προϊόντων (The Vehicle Routing Problem with Pick-up and Delivery-VRPPD)

3.4 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΠΑΡΑΛΑΒΗ ΚΑΙ ΔΙΑΝΟΜΗ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ (THE VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH PICK-UP AND DELIVERY VRPPD)

3.4.1 Εισαγωγή

Στο Γενικό Πρόβλημα της Παραλαβής και Διανομής Προϊόντων (General Pick up and Delivery Problem-GPDP), δημιουργείται ομάδα διαδρομών προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις για μεταφορά από στόλο οχημάτων. Κάθε όχημα του στόλου έχει δεδομένη χωρητικότητα, ένα σημείο εκκίνησης και ένα σημείο τερματισμού. Σε κάθε απαίτηση για μεταφορά, προσδιορίζεται το μέγεθος του προς μεταφορά φορτίου, καθώς και οι τόποι παραλαβής (προέλευση) και παράδοσης (προορισμοί). Κάθε φορτίο πρέπει να μεταφέρεται από ένα όχημα, από το σημείο προέλευσης στο σημείο προορισμού, χωρίς την πραγματοποίηση μεταφορτώσεων σε άλλες περιοχές. Η παρούσα εργασία αντιμετωπίζει το πρόβλημα της δρομολόγησης των υδροπλάνων ως Πρόβλημα Ταυτόχρονης Παραλαβής και Διανομής VRPSPD (VRP with Simultaneous Delivery and Pick-Up).



Σχήμα 3.1: Παραλλαγές του Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων

3.4.2 Ανασκόπηση των εφαρμογών του VRPSPD (VRP with Simultaneous Delivery and Pick-Up)

Για την επίλυση του VRPSPD έχουν εφαρμοσθεί αρκετές διαφορετικές μέθοδοι. Ο Dethloff (2001) πρότεινε και σύγκρινε μια σειρά από κατασκευαστικές ευρετικές μεθόδους (constructive heuristics) οι οποίες χρησιμοποιούν ορισμένα κριτήρια εισαγωγής. Οι Nagy and Salhi (2005) προτείνουν έναν αλγόριθμο τοπικής αναζήτησης που εντοπίζει μια αρχική λύση και τη βελτιώνει στα επόμενα στάδια. Ευρέως έχει χρησιμοποιηθεί η αναζήτηση tabu στο VRPSPD : Οι Crispim and Brandao (2005) εφαρμόζουν μια υβριδική προσέγγιση αναζήτησης ταμπού και κατάβασης μεταβλητής γειτονιάς (variable neighborhood descent-VND), ενώ οι Chen and Wu (2006) προτείνουν μια μέθοδο που ενσωματώνει την αναζήτηση ταμπού με έναν αλγόριθμο record-to-record (που αποδέχεται τις γειτονικές τιμές κάθε λύσης εφόσον αποκλίνουν μέχρι ένα συγκεκριμένο ποσοστό από την καλύτερη λύση). Οι Montane and Galvao (2006) εφαρμόζουν αμιγώς αναζήτηση ταμπού, χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση ποινής για να επιτύχουν διαφοροποίηση. Οι Dell’Amico et al (2006) είναι οι πρώτοι που εισάγουν μια ακριβή μέθοδο επίλυσης του VRPSPD συνδυάζοντας δυναμικό προγραμματισμό, δημιουργία στηλών και τη μέθοδο κλάδου και τιμής, που όμως οδηγεί σε πολύ μεγάλους υπολογιστικούς χρόνους. Οι Wassan et al. (2007) σχεδίασαν μια μέθοδο αναζήτησης ταμπού που αντιδρά στις επαναλήψεις ώστε να καθοδηγεί την αναζήτηση. Οι Bianchessi and Righini (2007) αξιολογούν και συγκρίνουν την επίδοση διάφορων κατασκευαστικών ευριστικών, μεθόδων τοπικής αναζήτησης και εφαρμογών αναζήτησης ταμπού. Οι Karlaftis et al.(2009) χρησιμοποιούν ένα γενετικό αλγόριθμο, ενώ οι Zachariadis et al. (2009) χρησιμοποιούν ένα υβρίδιο αναζήτησης ταμπού και καθοδηγούμενης τοπικής αναζήτησης. Οι Gajpal and Abad (2009) προτείνουν έναν αλγόριθμο αποικίας μυρμηγκιών, ενώ οι Ai and Kachitvichyanukul (2009) έναν αλγόριθμο σμήνους σωματιδίων. Οι Zachariadis et al. (2010) χρησιμοποιούν μια εφαρμογή Προγραμματισμού Προσαρμόσιμης Μνήμης (Adaptive Memory Programming), ενώ οι Zachariadis and Kiranoudis (2011) προτείνουν μια μεταευρετική μέθοδο τοπικής αναζήτησης.

Πίνακας 3.1: Σύνοψη των εφαρμογών του VRPSPD

Συγγραφείς	**Χρονολογία**	**Μέθοδος Επίλυσης**
Dethloff	2001	Κατασκευαστικές προσεγγιστικές μέθοδοι
Nagy and Salhi	2005	Τοπική αναζήτηση
Crispim and Brandao	2005	Αναζήτηση ταμπού-κατάβαση

Συγγραφείς	**Χρονολογία**	**Μέθοδος Επίλυσης**
		μεταβλητής γειτονιάς
Chen and Wu	2006	Αναζήτηση ταμπού-record-to record
Montane and Galvao	2006	Αναζήτηση ταμπού
Dell'Amico et al	2006	δυναμικό προγραμματισμό, δημιουργία στηλών, μέθοδος κλάδου και τιμής
Wassan et al.	2007	Αναζήτηση ταμπού
Bianchessi and Righini	2007	Κατασκευαστικές προσεγγιστικές- τοπική αναζήτησης-αναζήτηση ταμπού
Karlaftis et al.	2009	Γενετικός Αλγόριθμος
Zachariadis et al.	2009	Αναζήτηση ταμπού- Καθοδηγούμενη τοπική αναζήτηση
Gajpal and Abad	2009	Αλγόριθμος Αποικίας Μυρμηγκιών
Ai and Kachitvichyanukul	2009	Αλγόριθμος σμήνους σωματιδίων
Zachariadis et al.	2010	Προγραμματισμού Προσαρμόσιμης Μνήμης
Zachariadis and Kiranoudis	2011	Τοπική αναζήτηση

3.5 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΥΔΡΟΠΛΑΝΩΝ

Το πρόβλημα που πραγματεύεται η παρούσα εργασία αντιμετωπίζεται ως ένα πρόβλημα ταυτόχρονης παραλαβής και διανομής επιβατών (dial-a-ride), το οποίο αποτελεί παραλλαγή του κλασικού προβλήματος παραλαβής και διανομής (vrp with simultaneous pick-up and delivery-VRPSPD).Το Πρόβλημα Dial a Ride (Dial a Ride Problem- DARP) εντάσσεται στα προβλήματα παραλαβής και διανομής (PDP), με κύρια διαφορά από το βασικό PDP ότι στο πρόβλημα αυτό η μονάδα μεταφοράς είναι οι άνθρωποι, καθώς ως πελάτης ορίζεται το ίδιο το φορτίο (άνθρωποι) και όχι ο κάθε κόμβος.

Ορίζουμε ένα σύνολο κόμβων C με πλήθος 30 λιμάνια και ένα σύνολο ακμών E. Μια ακμή προσδιορίζεται μονοσήμαντα από ένα διατεταγμένο ζεύγος (i, j) με i, j $\in V, i \neq j$. Επομένως, το σύνολο των ακμών είναι $E \subset C \times C$. Σε κάθε ακμή (i, j) αντιστοιχεί ένα κόστος c_{ij} .Το c_{ij} αντιπροσωπεύει το κόστος της διαδρομής του αεροσκάφους που έχει επιλεγεί κατά μήκος της ακμής (i, j) .Θεωρούμε το σύνολο W του στόλου των υδροπλάνων που είναι διαθέσιμα. Κάθε ζεύγος κόμβων έχει μια συγκεκριμένη ζήτηση που είναι σταθερή. Σε κάθε κόμβο τα υδροπλάνα μπορούν να αποβιβάζουν και να επιβιβάζουν επιβάτες, επομένως η πληρότητα του σκάφους μεταβάλλεται. Τα υδροπλάνα αναχωρούν από το κομβικό λιμάνι και επιστρέφουν σε αυτό εντός ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος.

Μαθηματικά το πρόβλημα διατυπώνεται ως εξής (Karlaftis et al, 2009):

$$\min \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} \sum_{k \in W} c_{ijk} x_{ijk} + \sum_{j \in C} \sum_{k \in W} x_{0jk} + \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} u_{ij\kappa} \tag{3.17}$$

$$\sum_{i \in C} \sum_{k \in W} x_{ijk} = 1 \qquad \forall j \in C \tag{3.18}$$

$$\sum_{j \in C} \sum_{k \in W} x_{ijk} = 1 \qquad \forall i \in C \tag{3.19}$$

$$\sum_{i \in C} x_{ipk} = \sum_{j \in C} x_{pjk} \qquad \forall p \in C, k \in W \tag{3.20}$$

$$\sum_{i \in C} d_i \left(\sum_{j \in C} x_{jk} \right) \leq Q_k \qquad \forall k \in W \tag{3.21}$$

$$\sum_{i \in C} s_{ik} \sum_{j \in C} x_{ijk} + \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} t_{ijk} x_{ijk} \leq T_k \qquad \forall k \in W \tag{3.22}$$

$$\sum_{j \in C / \{0\}} x_{0jk} \leq 1 \qquad \forall k \in W \tag{3.23}$$

$$\sum_{i \in C / \{0\}} x_{i0k} \leq 1 \qquad \forall k \in W \tag{3.24}$$

$$x_{ijk} \in S \qquad \forall i \in C, j \in C, k \in W \tag{3.25}$$

$$S = \{ x_{ijk} : \sum_{i \in B} \sum_{j \in B} x_{ijk} \leq |B| - 1 \, for B \subseteq C / \{0\}; |B| \geq 2 \tag{3.26}$$

$$a_j \geq a_i + s_{ik} + t_{ijk} - (1 - x_{ijk}) \cdot T_k \qquad \forall i \in C, j \in C, k \in W \tag{3.27}$$

$$a_j \geq a_i + s_{ik} + t_{ijk} + (1 - x_{ijk}) \cdot T_k \qquad \forall i \in C, j \in C, k \in W \tag{3.28}$$

$$a_0 = 0 \tag{3.29}$$

$$l_{0k} = \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} d_j x_{ijk} \qquad \forall k \in W \tag{3.30}$$

$$l_{jk} \geq l_{0k} - d_j + p_j - M \cdot (1 - x_{0jk}) \qquad \forall j \in C, k \in W \tag{3.31}$$

$$l_{jk} \geq l_{ik} - d_j + p_j - M \cdot (1 - \sum_{k \in W} x_{ijk}) \qquad \forall i, j \in C, i \neq j \qquad (3.32)$$

$$l_{0k} \leq Q_k \qquad \forall k \in W \qquad (3.33)$$

$$l_{jk} \leq Q_k \qquad \forall j \in C, k \in W \qquad (3.34)$$

όπου:

c_{ijk} το κόστος που αντιστοιχεί στο τόξο ij για το υδροπλάνο k

t_{ijk} ο χρόνος που χρειάζεται το υδροπλάνο k για να διασχίσει το τόξο (i,j)

x_{ijk} =1 αν ο σύνδεσμος ij βρίσκεται στη διαδρομή του υδροπλάνου k, 0 αλλιώς

$u_{ij\kappa}$ ο αριθμός των επιβατών που δεν εξυπηρετούνται από το υδροπλάνο k προς τον κόμβο ij

C το σύνολο των κόμβων

W το σύνολο των υδροπλάνων

i,j,p κόμβοι που ανήκουν στο C

k υδροπλάνο που ανήκει στο W

d_i η ζήτηση για τον κόμβο i

Q_k η χωρητικότητα για το υδροπλάνο k

a_i, a_j οι χρόνοι άφιξης στα λιμάνια i,j

S_{ik} ο χρόνος που το υδροπλάνο k παραμένει στον κόμβο i

T_k ο μέγιστος χρόνος ταξιδιού, για το υδροπλάνο k.

l_{ok} ο αριθμός των επιβατών του υδροπλάνου k μετά την αναχώρηση από το κομβικό λιμάνι

l_{jk} ο αριθμός των επιβατών του υδροπλάνου k μετά την αναχώρηση από το λιμάνι j

p_j ο αριθμός των επιβατών που επιβιβάζονται στο λιμάνι j

M ένας αυθαίρετα μεγάλος αριθμός

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.17) ελαχιστοποιεί το μεταφορικό κόστος, τον αριθμό των διαδρομών καθώς και τον αριθμό των επιβατών που δεν εξυπηρετούνται μεταξύ διαδοχικών νησιών. Οι περιορισμοί (3.18) και (3.19) διασφαλίζουν ότι κάθε κόμβος εξυπηρετείται ακριβώς από ένα υδροπλάνο. Ο περιορισμός (3.20) εξασφαλίζει ότι κάθε υδροπλάνο εξέρχεται από τον κόμβο στον οποίο εισήλθε, ενώ ο (3.21) είναι ο περιορισμός της χωρητικότητας του υδροπλάνου. Ο περιορισμός (3.22) ορίζει το μέγιστο επιτρεπόμενο χρόνο ταξιδιού. Ο σκοπός των περιορισμών (3.23) και (3.24) είναι να διασφαλιστεί ότι δε γίνεται υπέρβαση του μέγιστου αριθμού υδροπλάνων. Οι περιορισμοί (3.25) και (3.26) είναι οι περιορισμοί εξάλειψης διαδρομών που δεν περιλαμβάνουν όλους τους κόμβους. Οι περιορισμοί (3.27) και (3.28) εξασφαλίζουν τους διαδοχικούς χρόνους άφιξης μεταξύ των λιμανιών. Το σύνολο των εξισώσεων (3.18)-(3.29) αποτελούν την τυπική διαμόρφωση για το Πρόβλημα της Δρομολόγησης Οχημάτων με Περιορισμούς Χωρητικότητας με θεώρηση χρονικών περιορισμών.

Η εξίσωση (3.30) ορίζει τον αρχικό αριθμό επιβατών των υδροπλάνων. Οι περιορισμοί (3.31) και (3.32) αντιστοιχούν στον αριθμό των επιβατών για τον πρώτο και τους επόμενους κόμβους (Dethloff, 2001). Οι περιορισμοί (3.33) και (3.34) διασφαλίζουν ότι δε γίνεται υπέρβαση της χωρητικότητας των υδροπλάνων μετά την αποχώρηση από τον πρώτο και τους επόμενους κόμβους και αντικαθιστούν τον περιορισμό (3.21) της τυπικής διατύπωσης του προβλήματος.

3.6 ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

3.6.1 Εισαγωγή στους γενετικούς αλγόριθμους

Οι γενετικοί αλγόριθμοι παρουσιάσθηκαν το 1975 από τον Holland και έκτοτε αποτελούν εργαλεία για την επίλυση προβλημάτων αναζήτησης και βελτιστοποίησης. Στηρίζονται στην προσομοίωση της εξέλιξης στη φύση, δανειζόμενοι μάλιστα και την ορολογία τους από τη σύγχρονη γενετική. Ανήκουν σε μία ευρύτερη κατηγορία αλγορίθμων, τους εξελικτικούς αλγόριθμους (evolutionary algorithms). Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι ανήκουν στη ευρύτερη ομάδα των μεταευρετικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης, ενώ η ευρεία χρήση τους οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο στοχαστικό χαρακτήρα που ακολουθούν κατά τη διάρκεια της επαναληπτικής διαδικασίας για τον εντοπισμό της βέλτιστης λύσης. Βέβαια, οι εξελικτικοί αλγόριθμοι και κατ’ επέκταση οι γενετικοί, δε μπορούν να εγγυηθούν την εύρεση της βέλτιστης λύσης, αλλά μιας «καλής» λύσης.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι προσπαθούν να βρουν τη λύση ενός προβλήματος προσομοιώνοντας την εξέλιξη ενός πληθυσμού «λύσεων» του προβλήματος. Η διαδικασία βασίζεται στην δημιουργία ενός τεχνητού κόσμου (πληθυσμού) από χρωμοσώματα (πιθανές λύσεις ενός προβλήματος), ο οποίος εξελίσσεται εφαρμόζοντας κανόνες αναπαραγωγής, ανταλλαγής και μετάλλαξης χρωμοσωμάτων, σε αντιστοιχία με τη φύση. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από γονίδια που ελέγχουν την παρουσία ή και το μέγεθος κάποιου χαρακτηριστικού. Η εξέλιξη του αλγόριθμου συνίσταται στην δημιουργία χρωμοσωμάτων συνδυάζοντας κάποια από τα μέλη του πληθυσμού. Για τη δημιουργία ενός νέου πληθυσμού, επιλέγονται χρωμοσώματα με βάση τα χαρακτηριστικά τους. Οι γενετικοί αλγόριθμοι του Holland αποτελούν μια μέθοδο εξέλιξης και βελτίωσης ενός πληθυσμού χρωμοσωμάτων, εφαρμόζοντας τεχνικές «φυσικής-τυχαίας επιλογής» και τους δανεισμένους από τη γενετική τελεστές διασταύρωσης (crossover), μετάλλαξης (mutation) και αντιστροφής (inversion). Σύμφωνα με τον Holland κάθε χρωμόσωμα αποτελείται από γονίδια (genes), τα οποία με τη σειρά τους μπορούν να πάρουν κάποιες συγκεκριμένες τιμές που ονομάζονται αλληλόμορφα (allele). Ο τελεστής επιλογής διαλέγει τα χρωμοσώματα του πληθυσμού που θα μπορέσουν να αναπαραχθούν, ενώ κατά μέσο όρο τα ικανότερα (fitter) αναπαράγουν περισσότερους απογόνους. Στους γενετικούς αλγόριθμους του Holland, μέσω του τελεστή διασταύρωσης ανταλλάσσονται κάποια μέρη μεταξύ δύο χρωμοσωμάτων, μέσω του τελεστή μετάλλαξης αλλάζονται τυχαία οι τιμές κάποιων αλληλόμορφων των χρωμοσωμάτων και τέλος, μέσω του τελεστή αντιστροφής πραγματοποιείται αναδιάταξη (συνήθως αντιστροφή) των γονιδίων των χρωμοσωμάτων. Κάθε λύση (τιμές για τις παραμέτρους του συστήματος) αξιολογείται μέσω μιας συνάρτησης που δίνει το μέτρο ικανότητας της λύσης και η οποία ονομάζεται συνάρτηση ικανότητας (fitness function).

Οι λύσεις που επιλέγονται από τη διαδικασία της επιλογής αναπαράγονται στην επόμενη γενιά λύσεων και λαμβάνουν μια τυχαία μετάλλαξη. Επαναλαμβάνοντας αυτή τη διαδικασία για αρκετές γενιές, οι τυχαίες μεταλλάξεις σε συνδυασμό με την επιβίωση και αναπαραγωγή των γονιδίων/λύσεων που πλησιάζουν καλύτερα το επιθυμητό αποτέλεσμα θα παράγουν ένα γονίδιο/λύση που θα περιέχει τις τιμές για τις παραμέτρους που ικανοποιούν όσο καλύτερα γίνεται την συνάρτηση ικανότητας.

Για την επίλυση ενός προβλήματος με χρήση γενετικών αλγορίθμων, ακολουθούνται συνήθως τα παρακάτω βήματα (Γεωργόπουλος και Λυκοθανάσης, 1999):

- Κωδικοποίηση της λύσης
- Καταρτισμός αρχικού πληθυσμού
- Αποτίμηση πληθυσμού μέσω συνάρτησης ικανότητας
- Επιλογή
- Διασταύρωση
- Μετάλλαξη

3.6.2 Κωδικοποίηση της λύσης

Ένας από τους κυριότερους, αν όχι ο κυριότερος παράγοντας για μια επιτυχημένη βελτιστοποίηση ενός προβλήματος με χρήση γενετικών αλγορίθμων αποτελεί ο τρόπος-σύστημα αναπαράστασης και κωδικοποίησης των υποψήφιων λύσεων, ή όπως αποκαλείται, η γενετική αναπαράσταση των λύσεων. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος αναπαράστασης των υποψήφιων λύσεων είναι η μετατροπή των μεταβλητών σχεδιασμού σε μια σειρά δυαδικών ψηφίων (0,1) (bit string). Συχνή είναι όμως και η αναπαράσταση λύσεων με χρήση ακεραίων ή πραγματικών αριθμών ενώ είναι δυνατή ακόμη και η χρήση χαρακτήρων, όπως είναι τα γράμματα της αλφαβήτου. Μάλιστα υπάρχουν και ακόμη πιο σύνθετοι τρόποι γενετικής αναπαράστασης όπως είναι η δενδροειδής κωδικοποίηση.

Ακόμη, κατά τη κωδικοποίηση συνεχών μεταβλητών με τη χρήση δυαδικών διανυσμάτων, η ακρίβεια της αναπαράστασης εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των δυαδικών ψηφίων, από το μήκος δηλαδή του διανύσματος. Έτσι με την αύξηση των δυαδικών ψηφίων που χρησιμοποιούνται, η ακρίβεια της αναπαράστασης της συνεχούς μεταβλητής μεγαλώνει.

3.6.3 Καταρτισμός αρχικού πληθυσμού

Στο πρώτο αυτό στάδιο παράγεται τυχαία ένας πληθυσμός από υποψήφιες πιθανές λύσεις. Κάθε μέλος του πληθυσμού αντιστοιχεί σε μια σειρά δυαδικών ψηφίων συγκεκριμένου μήκους που αποτελεί τη συνολική κωδικοποίηση που επιλέγεται για το σύνολο των μεταβλητών σχεδιασμού του προβλήματος. Κάθε τέτοια σειρά δυαδικών ψηφίων ονομάζεται γονότυπος ή χρωμόσωμα.

Ένα κρίσιμο και καθοριστικό χαρακτηριστικό που πρέπει να ορίζεται πάντοτε κατά την επίλυση προβλημάτων με χρήση γενετικών αλγορίθμων αποτελεί το μέγεθος του πληθυσμού, του αριθμού δηλαδή των χρωμοσωμάτων που συνθέτουν κάθε πληθυσμό. Πληθυσμοί αποτελούμενοι από μικρό αριθμό χρωμοσωμάτων γενικά μειώνουν αισθητά τις πιθανότητες πραγματοποίησης της διαδικασίας της διασταύρωσης με αποτέλεσμα να εξετάζεται ένα μικρό κομμάτι του χώρου αναζήτησης. Ακόμη, στη περίπτωση ενός μικρού πληθυσμού η εύρεση της λύσης επέρχεται αρκετά γρήγορα, είναι όμως συχνά εγκλωβισμένη σε τοπικά ακρότατα (μέγιστα ή ελάχιστα). Από την άλλη πλευρά, η ύπαρξη πληθυσμών μεγάλου μεγέθους μπορεί να απαλείψει αποτελεσματικά τα προαναφερθέντα προβλήματα, αυξάνοντας όμως σημαντικά τον απαιτούμενο χρόνο αναζήτησης της βέλτιστης λύσης (αντίστοιχα μειώνοντας τη ταχύτητα). Εμπειρικά έχει διατυπωθεί η άποψη πως ο βέλτιστος αριθμός χρωμοσωμάτων εντός του πληθυσμού είναι γύρω στα 20 με 30 για προβλήματα μέτριας δυσκολίας και 50 έως 100 για σύνθετα προβλήματα. Πρέπει να τονισθεί πως το μέγεθος του πληθυσμού παραμένει σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του γενετικού αλγόριθμου και δε μεταβάλλεται από γενιά σε γενιά.

3.6.4 Αποτίμηση πληθυσμού μέσω συνάρτησης ικανότητας

Για κάθε μέλος του πληθυσμού υπολογίζεται η αντικειμενική συνάρτηση, η οποία αποτελεί την προς βελτιστοποίηση συνάρτηση και είναι από τους πιο καθοριστικούς παράγοντες για τη διαδικασία αναζήτησης, εφόσον ορίζει τη μορφή του χώρου αναζήτησης. Ο υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης ενός χρωμοσώματος που αντιστοιχεί σε κάποιες τιμές του συνόλου των παραμέτρων σχεδιασμού του προβλήματος είναι ανεξάρτητος από τις τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού κάθε άλλου μέλους του πληθυσμού. Η ποιότητα όμως και η βαθμονόμηση ενός μέλους ορίζεται πάντα σε σχέση με τα υπόλοιπα μέλη του τρέχοντος πληθυσμού. Στον απλό γενετικό αλγόριθμο η ποιότητα του μέλους ορίζεται από το πηλίκο :

$$p = \frac{F_i}{\overline{F}}$$

όπου:

$\overline{F}$ η μέση τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης όλων των μελών του πληθυσμού

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

3.6.5 Επιλογή

Ο τελεστής επιλογής διαλέγει τα χρωμοσώματα από τον πληθυσμό που θα αναπαραχθούν. Τα χρωμοσώματα με μεγαλύτερη ικανότητα έχουν και περισσότερες πιθανότητες να επιλεχθούν για αναπαραγωγή. Όπως ακριβώς και με τους τρόπους κωδικοποίησης και αναπαράστασης, έχουν προταθεί διάφορες διαδικασίες επιλογής του νέου πληθυσμού, οι κυριότερες των οποίων είναι οι εξής (Michalewicz, 1996):

- **Αποδεκατισμός πληθυσμού (Population Decimation)**: Η απλούστερη ντετερμινιστική μέθοδος είναι η επιβίωση των χρωμοσωμάτων με την βέλτιστη τιμή της συνάρτησης κόστους, ενώ παράλληλα απομακρύνονται τα άτομα με την χειρότερη τιμή. Ο πληθυσμός αποδεκατίζεται πριν ξαναδημιουργηθεί μέσω της αναπαραγωγής. Αρχικά, τα άτομα κατατάσσονται σύμφωνα με την τιμή της συνάρτησης κόστους από τη μεγαλύτερη στη μικρότερη. Μια αυθαίρετη τιμή επιλέγεται σαν τιμή κατωφλίου και έπειτα, τα χρωμοσώματα με συνάρτηση κόστους χαμηλότερη από αυτή, απομακρύνονται από τον πληθυσμό. Τα υπόλοιπα άτομα χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία της νέας γενιάς, με τυχαίο συνδυασμό και αναπαραγωγή, τα οποία συνεχίζονται μέχρι να συμπληρωθεί η γενιά. Ο αποδεκατισμός του πληθυσμού χαρακτηρίζεται ως ντετερμινιστική μέθοδος καθώς τα άτομα που αποκλείονται από τον πληθυσμό επιλέγονται βάση κάποιας ντετερμινιστικής σύγκρισης μεταξύ των τιμών της συνάρτησης κόστους και μιας αυθαίρετης τιμής κατωφλίου.

- **Αναλογική επιλογή (Proportionate selection)**: Η πιο διαδεδομένη είναι η μέθοδος ρουλέτας με σχισμές (slotted roulette wheel), όπου κάθε μέλος του πληθυσμού αντιστοιχίζεται σε ένα κομμάτι-μερίδιο της ρουλέτας, το μέγεθος του οποίου εξαρτάται από την αξιολόγηση της «ικανότητάς» του. Η ρουλέτα περιστρέφεται τόσες φορές, όσος είναι και ο αριθμός των χρωμοσωμάτων κάθε πληθυσμού, και το χρωμόσωμα το οποίο τυχαίνει μετά από κάθε περιστροφή, επιλέγεται ως γονέας για τον επόμενο πληθυσμό. Είναι φανερό, πως κάθε χρωμόσωμα μπορεί να επιλεχθεί περισσότερες από μία φορές ενώ η πιθανότητα επιλογής είναι άμεση συνάρτηση της «ικανότητάς» του.
- **Επιλογή με βαθμονόμηση (Ranking selection)**: Είναι μια μέθοδος κατά την οποία τα χρωμοσώματα βαθμολογούνται-ταξινομούνται με βάση το μέτρο της συνάρτησης ικανότητας και λαμβάνουν έναν αύξοντα αριθμό. Έτσι, η προσδοκώμενη αξία κάθε χρωμοσώματος εξαρτάται από το βαθμό που έχει λάβει, ενώ το πλήθος των αντιγράφων με τα οποία κάθε μέλος θα αντιπροσωπεύεται στον ενδιάμεσο πληθυσμό εξαρτάται άμεσα από τον αύξοντα αριθμό ταξινόμησης.
- **Επιλογή με τουρνουά (Tournament selection)**: Γίνεται τυχαία επιλογή μιας ομάδας χρωμοσωμάτων του πληθυσμού και το «ικανότερο» από αυτά «κερδίζει» και επιλέγεται ως γονέας. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται τόσες φορές, όσο είναι και το μέγεθος του πληθυσμού, ενώ κάθε επανάληψη είναι ανεξάρτητη της προηγούμενης. Η πιο συνηθισμένη μορφή τουρνουά είναι αυτή όπου το N είναι ίσο με δύο δηλαδή η κάθε ομάδα αποτελείται από δύο χρωμοσώματα.
- **Διαβάθμιση Σίγμα (Sigma Scaling)**: Για την αντιμετώπιση του φαινομένου της πρώιμης σύγκλισης, έχουν δημιουργηθεί μέθοδοι επιλογής όπως η Διαβάθμιση Σίγμα, η οποία κρατάει την «πίεση της επιλογής», το βαθμό δηλαδή στον οποίο

κατάλληλα άτομα συμμετέχουν στη δημιουργία απογόνων, σε σταθερά επίπεδα σε όλη τη διάρκεια εξέλιξης του αλγόριθμου, χωρίς να εξαρτάται από τη διασπορά των τιμών της συνάρτησης κόστους. Στη μέθοδο αυτή η αναμενόμενη τιμή του κάθε ατόμου εξαρτάται από τη τιμή της συνάρτησης κόστους του f(i), τη μέση τιμή της συνάρτησης κόστους του πληθυσμού $\overline{f}(t)$ και την τυπική απόκλιση του πληθυσμού σ(t) σε χρόνο t.

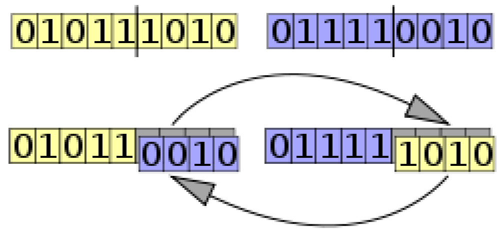
- **Ελιτισμός (Elitism)**: Τον ελιτισμό εισήγαγε πρώτος ο Kenneth De Jong το 1975 και ανήκει στη κατηγορία των μεθόδων επιλογής που αναγκάζουν τον γενετικό αλγόριθμο να κρατάει έναν αριθμό των καλύτερων ατόμων της κάθε γενιάς. Τα άτομα αυτά μπορεί να καταστραφούν με τη μετάλλαξη και τη διασταύρωση αν επιλεγούν για αναπαραγωγή ή να χαθούν αν δεν επιλεγούν καθόλου, για αυτό και ο αλγόριθμος τα μεταφέρει αυτούσια στην επόμενη γενιά.
- **Επιλογή Boltzmann**: Ενώ η Διαβάθμιση Σίγμα κρατάει την πίεση επιλογής σταθερή, υπάρχουν περιπτώσεις όπου είναι επιθυμητό να υπάρχει διαφοροποίηση στην πίεση επιλογής στα διάφορα στάδια εξέλιξης. Για παράδειγμα στα αρχικά στάδια ο αλγόριθμος πρέπει να επιτρέπει και στα λιγότερο κατάλληλα άτομα να μετέχουν στη διαδικασία αναπαραγωγής κρατώντας τη διασπορά των τιμών της συνάρτησης κόστους σε υψηλά επίπεδα, ενώ αργότερα είναι προτιμότερο η επιλογή να προσανατολίζεται στα πιο ισχυρά, με την προϋπόθεση βέβαια ότι εξαιτίας της αργής εξέλιξης ο αλγόριθμος έχει βρεθεί στο σωστό τμήμα του πεδίου αναζήτησης. Στην επιλογή Boltzmann η προκαθορισμένη μεταβλητή «θερμοκρασία» ελέγχει το ρυθμό της επιλογής. Η θερμοκρασία αρχικά έχει υψηλή τιμή ώστε η πίεση της επιλογής να είναι χαμηλή (δηλαδή κάθε άτομο να έχει πιθανότητα να μετέχει στην αναπαραγωγική διαδικασία). Η θερμοκρασία σταδιακά μειώνεται, αυξάνοντας τη πίεση της επιλογής, επιτρέποντας στον γενετικό να εστιάσει στη βέλτιστη περιοχή του πεδίου αναζήτησης.
- **Επιλογή σταθερής κατάστασης (Steady-state selection)**: Η επιλογή σταθερής κατάστασης αντικαθιστά λίγα άτομα σε κάθε γενιά και όχι όλα όπως συμβαίνει σε πολλές από τις υπόλοιπες μεθόδους. Σε αυτή τη μέθοδο, ένας μικρός αριθμός των λιγότερο κατάλληλων ατόμων αντικαθίσταται από απογόνους των πιο ισχυρών χρωμοσωμάτων.

- **Κανονικοποιημένη γεωμετρική βαθμονόμηση (normalized geometric ranking)**: Μία ακόμα πιο επιθετική μορφή επιλογής είναι η κανονικοποιημένη γεωμετρική βαθμονόμηση. Τα άτομα του πληθυσμού βαθμολογούνται από το καλύτερο στο χειρότερο σύμφωνα με την τιμή της συνάρτησης κόστους. Η πιθανότητα επιλογής του κάθε χρωμοσώματος υπολογίζεται σύμφωνα με τη κανονικοποιημένη γεωμετρική κατανομή.

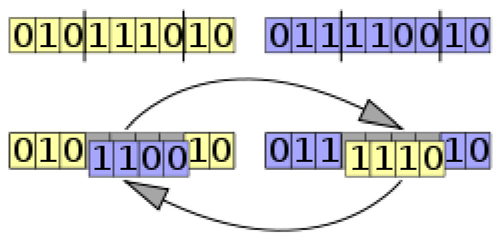
Είναι προφανές πως σκοπός της διαδικασίας της επιλογής, του τρόπου δηλαδή με τον οποίο θα επιλεχθούν τα χρωμοσώματα κάθε πληθυσμού ώστε να παράγουν απογόνους, είναι να προτιμούνται τα «ικανότερα» χρωμοσώματα τα οποία θα έχουν και τις περισσότερες πιθανότητες να δημιουργήσουν ακόμα πιο ικανούς απογόνους. Ωστόσο, πρέπει να διατηρούνται οι ισορροπίες καθώς υπάρχει ο κίνδυνος κατακλυσμού του πληθυσμού από ιδιαίτερα «ικανά» αλλά όχι βέλτιστα χρωμοσώματα, μειώνοντας δραστικά τη διαφορετικότητα εντός του πληθυσμού που απαιτείται για περεταίρω αλλαγή και εξέλιξη του τελευταίου. Η διαδικασία της επιλογής, εφαρμόζεται στον αλγόριθμο μέσω του ομώνυμου τελεστή και αποτελεί μια από τις βασικότερες, αν όχι τη βασικότερη διαδικασία του αλγορίθμου.

3.6.6 Διασταύρωση (Crossover)

Ο τελεστής διασταύρωσης επιλέγει τυχαία μια θέση, και ανταλλάσσει τις αλυσίδες των γονιδίων πριν ή/και μετά από αυτή τη θέση ανάμεσα στα δύο χρωμοσώματα για να παράξει δύο απογόνους. Θα μπορούσε κανείς να ισχυριστεί πως η διαδικασία της διασταύρωσης, η οποία εφαρμόζεται με χρήση του ομώνυμου τελεστή, είναι το βασικότερο διαχωριστικό χαρακτηριστικό των γενετικών αλγορίθμων από τους υπόλοιπους εξελικτικούς. Αρχικά επιλέγονται με πιθανότητα p_c, τα δύο χρωμοσώματα που θα διασταυρωθούν. Η διασταύρωση ενός σημείου αποτελεί την πιο απλουστευμένη μορφή αυτής της διαδικασίας και αναφέρεται στη τυχαία επιλογή ενός σημείου-θέσης διασταύρωσης, έπειτα από το οποίο οι δύο γονείς θα ανταλλάξουν τα αντίστοιχα τμήματα του χρωμοσώματός τους και θα παράξουν τους απογόνους τους. Ευρεία χρήση λόγω της αποτελεσματικότητάς της εμφανίζει και η διασταύρωση δύο σημείων, κατά την οποία επιλέγονται και πάλι τυχαία δύο σημεία-θέσεις. Τα γονίδια που εμπεριέχονται εντός των δύο αυτών θέσεων ανταλλάσσονται μεταξύ των δύο γονέων και παράγονται οι απόγονοι.



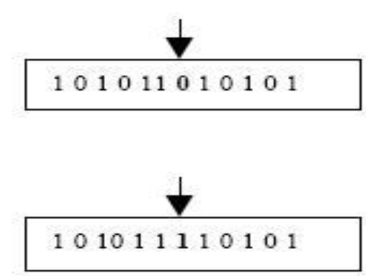
Σχήμα 3.2: Διασταύρωση ενός σημείου



Σχήμα 3.3: Διασταύρωση δύο σημείων

3.6.7 Μετάλλαξη (Mutation)

Ο τελεστής αυτός τυχαία αλλάζει τη τιμή κάποιων γονιδίων στο χρωμόσωμα. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη γενετική αναπαράσταση με δυαδικό σύστημα, επιλέγονται ορισμένα δυαδικά ψηφία του πληθυσμού με μικρή πιθανότητα p_m, η οποία συνήθως δε ξεπερνάει το 1%, και αντιστρέφονται, γίνεται δηλαδή μετατροπή του 0 σε 1 και αντίστροφα. Παρόλο που η διαδικασία της διασταύρωσης είναι το βασικό «εργαλείο» που προσδίδει τη διαφορετικότητα και την καινοτομία στους γενετικούς αλγορίθμους, η διαδικασία της μετάλλαξης είναι απαραίτητη καθώς εξασφαλίζει την ύπαρξης μιας μόνιμης κατάστασης σε κάποια θέση, λειτουργώντας έτσι υποστηρικτικά.



Σχήμα 3.4: Μετάλλαξη ενός γονιδίου

3.6.8 Άλλες μέθοδοι-διαδικασίες εξέλιξης των γενετικών αλγορίθμων

Παραπάνω παρουσιάστηκαν αναλυτικά οι πιο καθιερωμένες διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα με τη βοήθεια των ανάλογων τελεστών κατά τη λειτουργία των γενετικών αλγορίθμων. Πρέπει όμως να σημειωθεί πως τα τελευταία χρόνια έχει προταθεί ένα μεγάλο πλήθος τελεστών και γενικότερα στρατηγικών που χρησιμοποιούνται σε εξειδικευμένες περιπτώσεις με σκοπό την αποτελεσματικότερη επίτευξη της διαφορετικότητας εντός του πληθυσμού.

Στην αρχική του έρευνα, ο Holland χρησιμοποιεί έναν τελεστή αντιστροφής (inversion operator), σύμφωνα με τον οποίον επιλέγονται τυχαία δύο γονίδια του χρωμοσώματος και ανταλλάσουν θέσεις. Αυτό συμβαίνει περιστασιακά αντιστρέφοντας την σειρά ενός μέρους (ή όλου) του χρωμοσώματος. Αυτός ο τελεστής έχει σκοπό να αναπαράγει την ιδιότητα που παρατηρείται στη φύση, ότι δηλαδή η λειτουργία ενός γονιδίου είναι ανεξάρτητη από τη θέση του στο χρωμόσωμα. Για παράδειγμα, εάν το χρωμόσωμα 110111 υποστεί αντιστροφή στη 3η και 5η θέση, θα γίνει 111101.

Ένας ακόμη τελεστής είναι και αυτός που πρότεινε το 1975 ο De Jong, ο τελεστής συνωστισμού (crowding operator), σύμφωνα με τον οποίο κάθε νέο χρωμόσωμα που παράγεται δεν αντικαθιστά απαραίτητα τους γονείς του, αλλά εκείνο το χρωμόσωμα με το οποίο παρουσιάζει τις περισσότερες ομοιότητες, αποτρέποντας με αυτό τον τρόπο την συνύπαρξη πολλών παρομοίων χρωμοσωμάτων σε κάθε πληθυσμό.

Παρεμφερή με τον τελεστή συνωστισμού σκοπό έχει και η συνάρτηση κατανομής ικανότητας (fitness sharing function) που προτάθηκε από τους Goldberg και Richardson (1987). Σύμφωνα με τη τελευταία, η ικανότητα κάθε χρωμοσώματος ελαττώνεται από τη παρουσία άλλων χρωμοσωμάτων εντός του πληθυσμού, ενώ ο βαθμός στον οποίο γίνεται η μείωση είναι εκθετική αύξουσα συνάρτηση της ομοιότητας μεταξύ δύο χρωμοσωμάτων.

3.6.9 Πλεονεκτήματα των γενετικών αλγορίθμων

Μερικά από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που έχει η χρήση γενετικών αλγόριθμων για την επίλυση προβλημάτων είναι τα εξής (Γεωργόπουλος και Λυκοθανάσης, 1999):

- Για τη βελτιστοποίηση με γενετικούς αλγορίθμους απαιτείται μόνο η γνώση της αντικειμενικής συνάρτησης και όχι πρόσθετων πληροφοριών. Οι γενετικοί αλγόριθμοι «επικοινωνούν» με το περιβάλλον τους μέσω της συνάρτησης «ικανότητας», αδιαφορώντας για τη φύση του προβλήματος και τη σημασία της κάθε πληροφορίας. Δεν απαιτούνται περιορισμοί στην αντικειμενική συνάρτηση, πράγμα που αποτελεί μεγάλο πλεονέκτημα των γενετικών αλγορίθμων έναντι άλλων παραδοσιακών μεθόδων βελτιστοποίησης και τους επιτρέπει να επεξεργάζονται «θορυβώδεις» συναρτήσεις.

- Πραγματοποιείται ταυτόχρονη αναζήτηση υποψήφιων λύσεων σε πολλά σημεία του χώρου, σε αντίθεση με τη πλειοψηφία των κλασσικών μεθόδων βελτιστοποίησης, ενώ παράλληλα αξιοποιούνται οι ήδη επεξεργασμένες πληροφορίες. Έτσι, παρεμποδίζεται ο πιθανός τοπικός εγκλωβισμός του αλγορίθμου σε τοπικά ακρότατα μιας και η αναζήτηση γίνεται συνεχώς σε ένα πολύ ευρύ σύνολο σημείων. Έτσι, προηγούμενες λύσεις που στην ουσία ενδεχομένως να είχαν εγκλωβίσει τον αλγόριθμο σε περιοχές τοπικών βέλτιστων απομακρύνονται.
- Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν από τη φύση τους το στοιχείο του παραλληλισμού καθώς σε κάθε τους βήμα γίνεται επεξεργασία μεγάλης ποσότητας πληροφοριών και άρα προσφέρονται για παράλληλη υλοποίηση. Σε κάθε τους βήμα επεξεργάζονται μεγάλες ποσότητες πληροφορίας, αφού κάθε άτομο θεωρείται αντιπρόσωπος πολλών άλλων. Έχει υπολογιστεί ότι η αναλογία αυτή είναι της τάξεως $O(n^3)$, δηλαδή 10 άτομα αντιπροσωπεύουν περίπου 1000. Είναι, λοιπόν, προφανές ότι μπορούν να καλύψουν με αποδοτική αναζήτηση μεγάλους χώρους σε μικρούς χρόνους. Το χαρακτηριστικό αυτό αυξάνει ακόμη περισσότερο την απόδοσή τους, ενώ σπάνια συναντάται σε ανταγωνιστικές μεθόδους.
- Μπορούν να επιλύουν δύσκολα προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα. Ένας από τους σημαντικούς λόγους χρήσης των γενετικών αλγόριθμων είναι η μεγάλη τους αποδοτικότητα. Τόσο η θεωρία, όσο και η πράξη έχουν δείξει ότι προβλήματα που έχουν πολλές, δύσκολα προσδιορισμένες λύσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν καλύτερα με γενετικούς αλγόριθμους. Είναι δε αξιοσημείωτο ότι συναρτήσεις που παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις και καθιστούν ανεπαρκείς άλλες μεθόδους στην εύρεση των ακροτάτων τους, για τους γενετικούς δεν αποτελούν σημεία δυσχέρειας.
- Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τα υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα. Οι γενετικοί αλγόριθμοι προσφέρουν το σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης τους με προσθετικό τρόπο στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται σήμερα, χωρίς να απαιτείται η επανασχεδίασή τους. Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τον υπάρχοντα κώδικα, διότι χρησιμοποιούν μόνο πληροφορίες της διαδικασίας ή συνάρτησης που πρόκειται να βελτιστοποιήσουν, δίχως να ενδιαφέρει άμεσα ο

ρόλος της μέσα στο σύστημα ή η όλη δομή του συστήματος. Έτσι, μπορούν να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους. Αν και η ισχύς τους είναι μεγάλη, σε μερικές ειδικές περιπτώσεις προβλημάτων, όπου άλλες μέθοδοι συμβαίνει να έχουν πολύ υψηλή αποδοτικότητα, λόγω εξειδίκευσης, υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης ενός υβριδικού σχήματος γενετικού αλγόριθμου με άλλη μέθοδο.

- Είναι εύκολα επεκτάσιμοι και εξελίξιμοι. Οι γενετικοί αλγόριθμοι δεν αντιστέκονται σε αλλαγές, επεκτάσεις και μετεξελίξεις, ανάλογα με την κρίση του σχεδιαστή. Σε πολλές εφαρμογές, έχουν αναφερθεί λειτουργίες των γενετικών αλγόριθμων που δεν είναι δανεισμένες από τη φύση ή που έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές, πάντα προς όφελος της απόδοσης. Οι παραλλαγές στο βασικό σχήμα δεν είναι απλά αναγκαίες, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις επιβάλλονται.
- Εφαρμόζονται σε πολύ περισσότερα πεδία από κάθε άλλη μέθοδο. Το χαρακτηριστικό που τους εξασφαλίζει αυτό το πλεονέκτημα είναι η ελευθερία επιλογής των κριτηρίων που καθορίζουν την επιλογή μέσα στο τεχνικό περιβάλλον. Έτσι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην οικονομία, στο σχεδιασμό δικτύων, στην επίλυση μαθηματικών εξισώσεων, στην εκπαίδευση Νευρωνικών Δικτύων και σε πολλούς άλλους τομείς.
- Είναι μία μέθοδος που κάνει ταυτόχρονα εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και εκμετάλλευση της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας. Ο συνδυασμός αυτός σπάνια συναντάται σε οποιαδήποτε άλλη μέθοδο. Με την τυχαία αναζήτηση γίνεται καλή εξερεύνηση του χώρου, αλλά δεν γίνεται καλή εκμετάλλευση της πληροφορίας. Συνήθως τα δύο αυτά χαρακτηριστικά είναι ανταγωνιστικά και το επιθυμητό είναι να συνυπάρχουν και τα δύο προς όφελος της όλης διαδικασίας. Οι γενετικοί επιτυγχάνουν το βέλτιστο συνδυασμό εξερεύνησης και εκμετάλλευσης, πράγμα που τους κάνει ιδιαίτερα αποδοτικούς και ελκυστικούς.

Λαμβάνοντας υπόψη και αξιολογώντας τα παραπάνω μπορεί εύκολα κανείς να αντιληφθεί το λόγο για τον οποίο οι γενετικοί αλγόριθμοι βρίσκουν εφαρμογή σε ένα ιδιαίτερα ευρύ φάσμα πεδίων και προβλημάτων, όπως είναι για παράδειγμα η οικονομία, η εφοδιαστική και οι μεταφορές, η επίλυση σύνθετων μαθηματικών εξισώσεων και πολλά άλλα.

3.6.10 Επίλυση του Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων με γενετικούς αλγόριθμους

Η εφαρμογή των γενετικών αλγόριθμων στη βασική παραλλαγή του Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων είναι περιορισμένη, καθώς θεωρείται πως τα καλύτερα αποτελέσματα έχουν προκύψει με εφαρμογή αναζήτησης ταμπού ή προσομοιωμένης ανόπτησης. Ωστόσο, οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν χρησιμοποιηθεί συχνά για ορισμένες παραλλαγές του Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων, κυρίως όταν υπάρχουν χρονικά περιθώρια (VRPTW) ή περιορισμοί προτεραιότητας, καθώς πλεονεκτούν στην αντιμετώπιση προβλημάτων με πολύπλοκους περιορισμούς (Toth and Vigo, 2002). Ακόμη, υβριδικές προσεγγίσεις, όπου οι γενετικοί αλγόριθμοι συνδυάζονται με άλλες μεταευρετικές μεθόδους, έχουν αποδειχθεί εξίσου αποτελεσματικές με την αναζήτηση ταμπού και την προσομοιωμένη ανόπτηση, ακόμη και στην κλασσική παραλλαγή του Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων με Περιορισμούς στη Χωρητικότητα (Baker and Ayechew, 2003; Alba and Dorronsoro, 2006; Berger and Barkaoui, 2003).

Συνοπτικά, οι βασικοί λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκε γενετικός αλγόριθμος για το πρόβλημα μας, είναι:

- Η πολυπλοκότητα του Προβλήματος της Δρομολόγησης Οχημάτων (Lenstra and Kan, 1981) : όλες οι παραλλαγές του προβλήματος ανήκουν στην κατηγορία NP-Hard, δηλαδή δεν επιλύονται σε πολυωνυμικό χρόνο. Συνεπώς, δεν είναι δυνατή η εφαρμογή μιας ντετερμινιστικής μεθόδου για την εύρεση της ακριβούς λύσης, αλλά απαιτείται η χρήση μιας προσεγγιστικής μεθόδου. Οι γενετικοί αλγόριθμοι, με βάση και όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως, είναι σε θέση να αντιμετωπίζουν ποικιλία προβλημάτων μεγάλης δυσκολίας και αποτελούν ένα ισχυρό και εύρωστο εργαλείο βελτιστοποίησης.
- Η ικανοποιητική απόδοση των γενετικών αλγορίθμων στο Πρόβλημα Παραλαβής και Διανομής με Χρονικούς Περιορισμούς (Pankratz, 2005; Jih and Hsu, 2013). Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης παρουσιάζουν μικρή τυπική απόκλιση, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις τα αποτελέσματα είναι καλύτερα από εκείνα των προηγούμενων εργασιών.
- Η ανάγκη για μια καλής ποιότητας λύση σε αποδεκτό χρόνο (Sáez et al, 2008) . Γενικώς, οι υπολογιστικοί χρόνοι δεν ξεπερνούν τα 30 λεπτά, ενώ παρατηρείται

ότι όσο αυξάνεται το μέγεθος του προβλήματος, τόσο υπερτερεί η χρήση των γενετικών αλγόριθμων έναντι άλλων μεθόδων σε ό,τι αφορά στην εξοικονόμηση χρόνου.

3.7 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

3.7.1 Εισαγωγή

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Evolver©, το οποίο επιλύει προβλήματα με χρήση γενετικών αλγορίθμων. Το υπολογιστικό πακέτο Evolver© αναπτύχθηκε από την εταιρεία *Palisade* και αποτελεί πρόσθετο στο πρόγραμμα Excel© της Microsoft για λύση προβλημάτων βελτιστοποίησης με χρήση γενετικών αλγορίθμων. Στο Excel© εισάγονται τα δεδομένα και οι τύποι και προσδιορίζονται τα κελιά των οποίων οι τιμές μεταβάλλονται για να επιτευχθεί ο στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης, ενώ η επίλυση του μοντέλου γίνεται με το Evolver©, όπου προσδιορίζεται ο στόχος του προβλήματος με τους περιορισμούς του και οι τιμές των παραμέτρων του γενετικού αλγόριθμου.

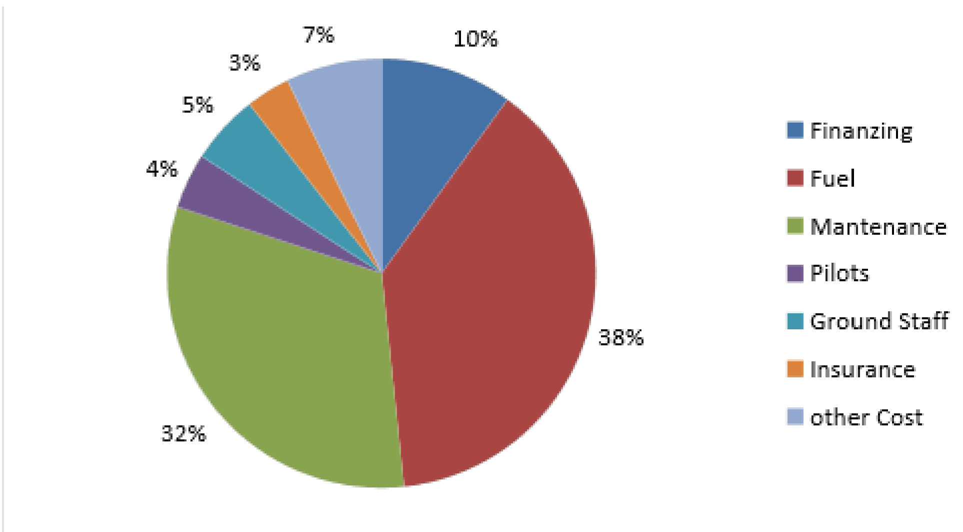
Μοντέλο υδροπλάνου

Στην παρούσα εργασία το μοντέλο υδροπλάνου που χρησιμοποιείται είναι το DHC-6 Twin Otter με χωρητικότητα 19 θέσεων και μέση ταχύτητα πλεύσης 130 κόμβους.

Σχήμα 3.5: DHC-6 Twin Otter

Πίνακας 3.2: Κόστος λειτουργίας

Μοντέλο υδροπλάνου	**Twin Otter**
Λειτουργικό κόστος ανά ώρα (καύσιμα, συντήρηση, εργατικά, επισκευή μηχανής, κ.ά)	$1.177,00
Κόστος ανά ναυτικό μίλι	$9,05
Ταχύτητα πλεύσης	130 KTAS
Αριθμός θέσεων	19
Εμβέλεια	989 nm



Σχήμα 3.6: Τυπική κατανομή κόστους για ένα υδροπλάνο

3.7.2 Χαρακτηριστικά του γενετικού αλγόριθμου

3.7.2.1 Αναπαράσταση της λύσης

Κάθε χρωμόσωμα αναπαριστά μια ακολουθία κόμβων, η οποία ερμηνεύεται ως η σειρά με την οποία ένα υδροπλάνο πρέπει να επισκεφτεί όλους τους κόμβους, εάν το ίδιο υδροπλάνο έπρεπε να πραγματοποιήσει όλες τις διαδρομές διαδοχικά (Bjarnadottir, 2003). Για το πρόβλημά μας, όπου το σύνολο των κόμβων έχει πλήθος n=30, ένα πιθανό χρωμόσωμα θα μπορούσε να είναι:

[1 2 3 26 27 4 5 6 7 10 19 20 21 22 11 12 13 14 15 16 17 18 8 9 23 24 25 28 29 30]

Εάν το κομβικό λιμάνι (εδώ το Λαύριο) χαρακτηριστεί από τον αριθμό 0, τότε μια πιθανή διαδρομή που περιέχεται στο χρωμόσωμα θα μπορούσε να είναι :

0→1→2→3→26→0

Και η επόμενη στη σειρά, πραγματοποιούμενη από ένα άλλο υδροπλάνο, θα μπορούσε να είναι:

0→27→4→5→6→7→0

Κάθε κόμβος χαρακτηρίζεται από ένα συγκεκριμένο αριθμό και μια ακολουθία αριθμών αντιπροσωπεύει τους κόμβους που περιέχονται σε μία διαδρομή. Οι διαδρομές δεν διαχωρίζονται , επομένως είναι δυνατή η εφαρμογή των τελεστών διασταύρωσης και μετάλλαξης. Οι διαδρομές προκύπτουν με βάση μια ευρετική μέθοδο που περιγράφεται αναλυτικά στα επόμενα. Η μέθοδος δημιουργεί διαδρομές με βάση τη ζήτηση από και προς το κομβικό λιμάνι, εξαντλώντας τη χωρητικότητα των υδροπλάνων.

3.7.2.3 Συνάρτηση Ικανότητας

Κάθε χρωμόσωμα αποτιμάται με βάση το μέτρο της συνάρτησης ικανότητας, το οποίο είναι το άθροισμα του συνολικού χρόνου διαδρομής και του χρόνου παραμονής σε κάθε λιμάνι, του αριθμού των διαδρομών καθώς και του αριθμού των επιβατών που δεν εξυπηρετούνται στα ενδιάμεσα νησιά. Το μέτρο της συνάρτησης ικανότητας δίνεται από τη σχέση:

$$C = \sum_{r \in R} \sum_{n \in W_r \subseteq W} t_{r,(n-1)n} + \sum_{m \in W} s_m + num + \sum_{i \in W} \sum_{j \in W} u_{ij}$$

όπου:

R το σύνολο των διαδρομών

r η διαδρομή που ανήκει στο R

W το σύνολο των κόμβων

W_r το σύνολο των κόμβων που περιλαμβάνονται στη διαδρομή r

n κόμβος που ανήκει στο W

num ο αριθμός των διαδρομών

s_m ο χρόνος εξυπηρέτησης στον κόμβο m

u_{ij} ο αριθμός των επιβατών που δεν εξυπηρετούνται στα ενδιάμεσα νησιά.

Εφαρμόζουμε μια συνάρτηση ποινής για διαδρομές με χρόνο που υπερβαίνει τις 5 ώρες. Η ποινή είναι εκθετική, ώστε να αυξάνεται απότομα το κόστος των λύσεων με χρόνο άνω του επιθυμητού. Η συνάρτηση ικανότητας παίρνει τη μορφή:

$$C = a_r \sum_{r \in R} \sum_{n \in W_r \subseteq W} t_{r,(n-1)n} + a_r \sum_{m \in W} s_m + num + \sum_{i \in W} \sum_{j \in W} u_{ij}$$

όπου:

$a_r = p \cdot e^{\wedge}(pen_r)$ η συνάρτηση ποινής με p έναν αυθαίρετα ορισμένο συντελεστή ποινής

pen_r η χρονική υπέρβαση του ορίου των 5 ωρών που έχουμε ορίσει για τη διαδρομή r.

3.7.2.4 Αρχικός Πληθυσμός- Επιλογή

Ο αρχικός πληθυσμός παράγεται τυχαία. Το μέγεθος του πληθυσμού παίρνει τις τιμές 50, 75 και 100. Ακολουθείται η μέθοδος επιλογής με βαθμονόμηση, όπου τα μέλη του πληθυσμού ιεραρχούνται με βάση το μέτρο της συνάρτησης ικανότητας. Σε αντίθεση με τη συχνά εφαρμοζόμενη μέθοδο της αναλογικής επιλογής όπου η πιθανότητα επιλογής ενός μέλους για αναπαραγωγή είναι ευθέως ανάλογη με το μέτρο της συνάρτησης ικανότητας, η επιλογή με βαθμονόμηση επιτρέπει και σε λιγότερο ικανά μέλη του πληθυσμού να συμμετέχουν στην επόμενη γενιά, αποτρέποντας την κυριαρχία των πιο ικανών μελών από τα αρχικά στάδια της διαδικασίας (Blicke and Thiele, 1996).

3.7.2.5 Διασταύρωση

Στη διαδικασία της διασταύρωσης επιλέγονται τυχαία δύο σημεία στο χρωμόσωμα-γονέα και τα γονίδια που περιέχονται στο τμήμα που ορίζουν αντιγράφονται στον πρώτο απόγονο (Toth and Vigo, 2002). Τα υπόλοιπα γονίδια που δεν περιέχονται στο τμήμα αυτό αντιγράφονται με τη σειρά που εμφανίζονται στο δεύτερο γονέα. Για τον δεύτερο απόγονο ακολουθείται η ίδια διαδικασία, με τους ρόλους των γονέων να αντιστρέφονται. Η διαδικασία αυτή διατηρεί ορισμένες από τις διατάξεις μέσα στο χρωμόσωμα, ενώ δημιουργεί νέες. Ένα παράδειγμα είναι το εξής:

[1 2 3 **4 5 6 7** 8 9 10] → [2 8 10 **4 5 6 7** 9 3 1]

[2 5 8 **4 10 9 7** 3 1 6] → [1 2 3 **4 10 9 7** 5 6 8]

3.7.2.6 Μετάλλαξη

Για τη διατήρηση των τιμών των γονιδίων, η μετάλλαξη πραγματοποιείται ανταλλάσσοντας τις θέσεις κάποιων τιμών στον οργανισμό (Jih and Hsu, 2013). Ο αριθμός των ανταλλαγών αυξάνεται ή μειώνεται αναλογικά με την αύξηση ή μείωση της παραμέτρου μετάλλαξης (από 0 ως 1). Ένα παράδειγμα είναι το εξής:

[1 2 3 **4** 5 6 7 **8** 9 10] → [1 2 3 **8** 5 6 7 **4** 9 10]

3.7.2.7 Αντικατάσταση

Χρησιμοποιείται μια μέθοδος αντικατάστασης με βάση την κατάταξη των μελών του πληθυσμού, όπου τα λιγότερο ‘ικανά’ μέλη αντικαθιστώνται από νέα που δημιουργούνται από την επιλογή, διασταύρωση και μετάλλαξη, ανεξάρτητα από την τιμή της συνάρτησης ικανότητας (Holland, 1975).

3.7.2.8 Αλγόριθμος διαχωρισμού διαδρομών

Εφόσον δεν διαχωρίζονται οι διαδρομές μέσα στο χρωμόσωμα, απαιτείται ένας αλγόριθμος για εύρεση εφικτών διαδρομών (Prins, 2004). Ο αλγόριθμος ορίζει τις διαδρομές με βάση τη ζήτηση από και προς το κομβικό λιμάνι και υπολογίζει το κόστος κάθε διαδρομής, που ισούται με το μέτρο της συνάρτησης καταλληλότητας.

Βήμα 1: Εκκίνηση

Η διαδικασία ξεκινά με το πρώτο γονίδιο του χρωμοσώματος, που αντιστοιχίζεται στο πρώτο λιμάνι της διαδρομής.

Βήμα 2: Κατασκευή διαδρομών

Για κάθε κόμβο που περιέχεται στην ακολουθία του χρωμοσώματος υπολογίζονται 3 αθροίσματα:

1. Το άθροισμα όλων των επιβατών με αφετηρία το κομβικό λιμάνι
2. Το άθροισμα όλων των επιβατών με προορισμό το κομβικό λιμάνι
3. Το άθροισμα όσων επιβατών έχουν ανέβει στα προηγούμενα λιμάνια και έχουν προορισμό το κομβικό λιμάνι (κατά την επιστροφή του υδροπλάνου) συν τον αριθμό των επιβατών που έχουν ως προορισμό το συγκεκριμένο λιμάνι

Βήμα 3: Ολοκλήρωση διαδρομής

Περίπτωση 1: Εάν παραβιάζονται εξαρχής οι περιορισμοί χωρητικότητας, ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα 1 και θέτει το λιμάνι ως πρώτο στην επόμενη διαδρομή.

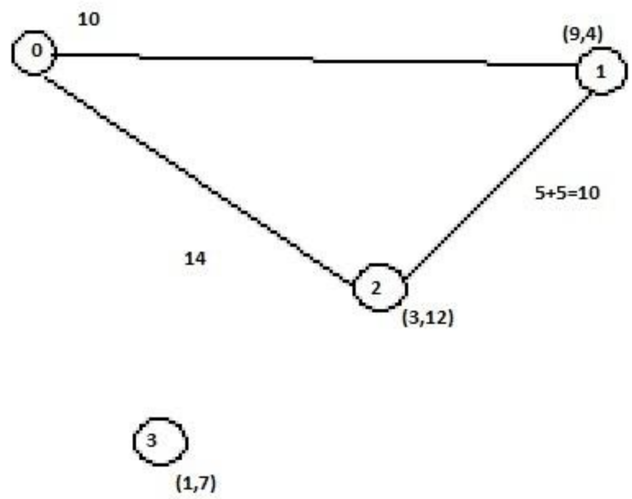
Περίπτωση 2: Εφόσον δεν παραβιάζονται οι περιορισμοί χωρητικότητας, το επόμενο λιμάνι στη σειρά προστίθεται στη διαδρομή. Στη συνέχεια, υπολογίζεται το περιθώριο χωρητικότητας , εάν υπάρχει, αφαιρώντας τον αριθμό των επιβατών που βρίσκονται εντός του υδροπλάνου από τη μέγιστη χωρητικότητα που έχει και υπολογίζεται ο αριθμός των επιβατών που μπορούν να εξυπηρετηθούν από το προηγούμενο προς αυτό το νησί. Εάν δεν είναι δυνατή η εξυπηρέτηση όλων των επιβατών, επιβιβάζονται όσοι χωρούν. Ο αλγόριθμος επιστρέφει έπειτα, στο βήμα 1, ελέγχοντας τον επόμενο κόμβο. Σε περίπτωση που δε μπορεί να προστεθεί άλλος κόμβος στη διαδρομή, ο αλγόριθμος θέτει το επόμενο λιμάνι ως πρώτο στην επόμενη διαδρομή.

Βήμα 4: Τερματισμός διαδικασίας

Όταν όλοι κόμβοι περιληφθούν σε κάποια διαδρομή, η διαδικασία τερματίζει.

Ο τρόπος λειτουργίας του αλγόριθμου γίνεται κατανοητός μέσα από το ακόλουθο παράδειγμα:

Έστω 19 η χωρητικότητα του υδροπλάνου και οι αριθμοί στις παρενθέσεις οι αριθμοί των επιβατών που αποβιβάζονται και επιβιβάζονται, αντίστοιχα. Επίσης, έστω 5 ο αριθμός των επιβατών που θέλουν να μετακινηθούν από το 1 στο 2. Το υδροπλάνο ξεκινά με φορτίο 10 επιβατών. Στον κόμβο 1 επιβιβάζονται 4 και αποβιβάζονται 9, επομένως εντός του υδροπλάνου απομένουν 10-9+4=5 επιβάτες. Επομένως, υπάρχει περιθώριο εξυπηρέτησης των 5 επιβατών που μετακινούνται από το 1 στο 2, οι οποίοι και επιβιβάζονται. Στον κόμβο 2 αποβιβάζονται, εκτός από αυτούς τους 5, 3 επιβάτες και επιβιβάζονται 12. Εάν το υδροπλάνο επιστρέψει στο αρχικό λιμάνι θα έχει φορτίο : 5-3+12=14 επιβάτες. Εάν συνέχιζε στον κόμβο 3 θα είχε φορτίο 14+7-1=20 επιβάτες, αριθμός που υπερβαίνει τη χωρητικότητα του υδροπλάνου. Επομένως, ο κόμβος 3 θα περιληφθεί σε καινούρια διαδρομή.



Σχήμα 3.7: Παράδειγμα εφαρμογής του αλγόριθμου δημιουργίας διαδρομών

3.7.2.9 Τερματισμός γενετικού αλγόριθμου

Όταν έπειτα από 10000 επαναλήψεις δεν υπάρχει βελτίωση της αντικειμενικής συνάρτησης μεγαλύτερη του 1%, ο αλγόριθμος τερματίζει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του αλγόριθμου και πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας με βάση το συνδυασμό παραμέτρων που δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα.

4.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται για τη δρομολόγηση ενός στόλου υδροπλάνων από το λιμάνι του Λαυρίου προς ένα σύνολο 30 νησιών. Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται οι αποστάσεις σε ναυτικά μίλια μεταξύ των νησιών. Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζεται η επιβατική ζήτηση από και προς το Λαύριο και μεταξύ των νησιών (το μητρώο ζήτησης έχει παραχθεί με τυχαίο τρόπο). Ο χρόνος εξυπηρέτησης λαμβάνεται ίσος με 20 λεπτά σε κάθε νησί, ενώ η χωρητικότητα ίση με 19 θέσεις και η ταχύτητα πλεύσης ίση με 130 ναυτικά μίλια ανά ώρα.

4.2.1 Παράμετροι του γενετικού αλγόριθμου

Πραγματοποιούνται δοκιμές με μέγεθος πληθυσμού 50,75 και 100, συντελεστή διασταύρωσης 0.2, 0.4 και 0.6 και συντελεστή μετάλλαξης 0.05, 0.1 και 0.15. Ο αλγόριθμος εκτελείται συνολικά 135 φορές, 5 φορές για κάθε πιθανό συνδυασμό αυτών των παραμέτρων.

4.2.2 Συνάρτηση ποινής

Η συνάρτηση ποινής εφαρμόζεται με συντελεστή p=2 για τις διαδρομές με συνολική διάρκεια άνω των 5 ωρών, ώστε να αυξάνεται το κόστος των λύσεων που περιέχουν τέτοιες διαδρομές και τελικώς, να αποφεύγονται.

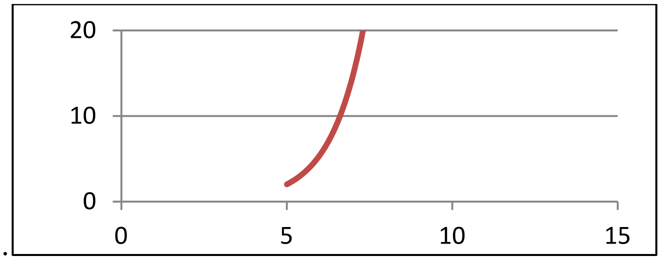
Πίνακας 4.1: Αποστάσεις μεταξύ νησιών

Lavrio		Rethimno	Iraklio	Kithira	Milos	Kea	Thira	Paros	Naxos	Syros	Mykonos	Tinos	Andros	Chios	Ikaria	Samos	Astypalea	Karpathos	Rhodes	Kos	Kalimnos	Skiros	Mytilene	Limnos	Amorgos	Sifnos	Serifos	Kythnos	Leros	Ios	Kastelorizo
142	Rethimno	0	38	108	100	165	95	130	136	152	157	162	182	237	194	226	139	177	233	200	186	251	300	330	133	118	109	126	158	90	268
154	Iraklio	38	0	142	109	174	69	126	129	152	152	159	184	227	179	206	115	141	199	171	161	258	289	328	117	122	113	135	137	84	234
101	Kithira	108	142	0	88	122	138	135	154	138	160	153	151	233	211	251	194	251	302	251	234	216	294	306	169	107	103	110	202	122	335
65	Milos	100	109	88	0	67	80	49	61	63	73	71	84	153	130	164	113	185	221	166	148	152	216	235	84	17	28	44	132	56	284
17	Kea	165	174	122	67	0	106	71	83	51	61	49	30	119	133	153	152	229	254	178	160	94	165	166	105	58	47	28	138	89	310
105	Thira	95	69	138	80	106	0	60	50	74	71	81	119	144	99	131	57	128	166	116	100	178	225	247	39	55	68	90	98	29	230
68	Paros	130	126	135	49	71	60	0	19	26	28	33	59	109	60	115	79	164	183	124	106	131	172	202	51	30	32	49	89	44	261
77	Naxos	136	129	154	61	83	50	19	0	35	25	34	67	101	63	104	66	157	171	111	93	135	164	201	40	42	47	63	76	37	248
55	Syros	152	152	138	63	51	74	26	35	0	17	14	34	96	78	120	119	192	203	142	123	104	152	177	73	36	43	51	97	60	268
67	Mykonos	157	152	160	73	61	71	28	25	17	0	10	52	82	56	97	87	180	182	120	102	111	142	178	54	51	52	61	91	60	268
54	Tinos	162	159	153	71	49	81	33	34	14	10	0	35	81	63	105	100	185	194	132	113	100	138	169	65	49	47	56	94	59	267
59	Andros	182	184	151	84	30	119	59	67	34	52	35	0	87	103	129	152	223	243	164	146	70	135	145	101	65	49	75	112	97	289
120	Chios	237	227	233	153	119	144	109	101	96	82	81	87	0	54	57	133	216	207	126	114	107	55	124	113	130	118	131	108	119	289
116	Ikaria	194	179	211	130	133	99	60	63	78	56	63	103	54	0	22	77	161	162	78	63	133	135	177	62	103	95	106	42	83	227
143	Samos	226	206	251	164	153	131	115	104	120	97	105	129	57	22	0	95	163	158	66	58	159	146	185	93	144	139	153	56	125	243
144	Astypalea	139	115	194	113	152	57	79	66	119	87	100	152	133	77	95	0	90	109	60	44	195	223	260	54	103	110	132	51	65	179
218	Karpathos	177	141	251	185	229	128	164	157	192	180	185	223	216	161	163	90	0	94	100	106	286	310	350	124	183	194	214	113	149	129
221	Rhodes	233	199	302	221	254	166	183	171	203	182	194	243	207	162	158	109	94	0	64	89	288	317	360	139	212	239	261	153	193	80
172	Kos	200	171	251	166	178	116	124	111	142	120	132	164	126	78	66	60	100	64	0	16	217	225	284	82	152	144	155	31	105	183
156	Kalimnos	186	161	234	148	160	100	106	93	123	102	113	146	114	63	58	44	106	89	16	0	201	211	271	65	133	132	147	28	97	186
85	Skiros	251	258	216	152	94	178	131	135	104	111	100	70	107	133	159	195	286	288	217	201	0	115	80	164	134	120	106	160	97	341
154	Mytilene	300	289	294	216	165	225	172	164	152	142	138	135	55	135	146	223	310	317	225	211	115	0	102	197	199	173	168	163	152	344
152	Limnos	330	328	306	235	166	247	202	201	177	178	169	145	124	177	185	260	350	360	284	271	80	102	0	230	213	173	159	201	174	382
136	Amorgos	133	117	169	84	105	39	51	40	73	54	65	101	113	62	93	54	124	139	82	65	164	197	230	0	71	84	106	47	201	271
54	Sifnos	118	122	107	17	58	55	30	42	36	51	49	65	130	103	144	103	183	212	152	133	134	199	213	71	0	15	37	120	44	271
48	Serifos	109	113	103	28	47	68	32	47	43	52	47	49	118	95	139	110	194	239	144	132	120	173	173	84	15	0	30	115	44	280
26	Kythnos	126	135	110	44	28	90	49	63	51	61	56	75	131	106	153	132	214	261	155	147	106	168	159	106	37	30	0	131	52	302
144	Leros	158	137	202	132	138	98	89	76	97	91	94	112	108	42	56	51	113	153	31	28	160	163	201	47	120	115	131	0	74	194
86	Ios	90	84	122	56	89	29	44	37	60	60	59	97	119	83	125	65	149	193	105	97	97	152	174	201	44	44	52	74	0	234
291	Kastelorizo	268	234	335	284	310	230	261	248	268	268	267	289	289	227	243	179	129	80	183	186	341	344	382	271	271	280	302	194	234	0

Πίνακας 4.2: Επιβατική Ζήτηση

d0= Apo Lavrio		Rethimno	Iraklio	Kithira	Milos	Kea	Thira	Paros	Naxos	Syros	Mykonos	Tinos	Andros	Chios	Ikaria	Samos
9	Rethimno	0	6	2	4	1	12	6	7	7	3	2	2	6	2	5
3	Iraklio	6	0	6	13	2	4	2	3	5	13	10	8	3	8	4
2	Kithira	2	6	0	1	2	1	3	1	1	5	6	7	1	4	8
6	Milos	4	13	1	0	1	3	6	5	6	2	2	1	2	1	1
4	Kea	1	2	2	1	0	1	2	3	4	1	2	5	2	4	1
8	Thira	12	4	1	3	1	0	13	2	3	7	4	2	8	3	6
7	Paros	6	2	3	6	2	13	0	9	5	8	2	8	13	7	7
9	Naxos	7	3	1	5	3	2	9	0	3	5	1	8	2	9	12
10	Syros	7	5	1	6	4	3	5	3	0	5	2	7	6	6	11
12	Mykonos	3	13	5	2	1	7	8	5	5	0	9	7	8	6	8
16	Tinos	2	10	6	2	2	4	2	1	2	9	0	4	5	6	6
14	Andros	2	8	7	1	5	2	8	8	7	7	4	0	4	2	4
3	Chios	6	3	1	2	2	8	13	2	6	8	5	4	0	3	4
4	Ikaria (Ag	2	8	4	1	4	3	7	9	6	6	6	2	3	0	2
9	Samos	5	4	8	1	1	6	7	12	11	8	6	4	4	2	0
2	Astypalea	4	3	9	4	5	1	1	1	2	2	7	5	1	3	1
1	Karpathos	1	10	3	5	6	1	1	1	1	3	8	6	1	4	2
6	Rhodes	6	3	3	5	7	6	4	7	6	4	2	2	6	3	4
7	Kos	6	5	6	1	8	8	6	11	8	5	4	2	7	10	5
4	Kalimnos	3	9	8	1	9	5	4	8	5	3	2	2	8	7	6
2	Skiros	6	1	2	6	2	0	1	1	1	1	1	1	3	5	1
10	Mytilene	7	3	1	2	2	6	9	13	7	9	8	9	8	9	7
4	Limnos (M	1	5	5	7	3	1	1	2	3	1	1	2	10	1	4
1	Amorgos	1	4	6	8	4	4	2	5	2	1	1	6	2	1	2
5	Sifnos	1	5	7	10	5	3	9	6	9	2	2	7	2	7	1
3	Serifos	1	3	9	2	6	1	4	3	4	1	1	1	1	4	3
12	Kythnos	1	2	11	1	7	1	2	1	3	1	1	2	1	3	4
2	Leros (La	2	13	12	9	8	3	3	6	4	2	2	1	8	8	5
1	Ios	2	9	2	1	9	8	3	6	3	1	1	3	2	1	1
3	Kastelorizo	1	10	5	2	10	9	8	4	3	5	4	4	3	2	6

	Astypalea	Karpathos	Rhodes	Kos	Kalimnos	Skiros	Mytilene	Limnos	Amorgos	Sifnos	Serifos	Kythnos	Leros	Ios	Kastelorizo	num	d31= pros Lavrio
Rethimno	4	1	6	6	3	6	7	1	1	1	1	1	2	2	1	1	9
Iraklio	3	10	3	5	9	1	3	5	4	5	3	2	13	9	10	2	2
Kithira	9	3	3	6	8	2	1	5	6	7	9	11	12	2	5	3	2
Milos	4	5	5	1	1	6	2	7	8	10	2	1	9	1	2	4	6
Kea	5	6	7	8	9	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	5	6
Thira	1	1	6	8	5	0	6	1	4	3	1	1	3	8	9	6	8
Paros	1	1	4	6	4	1	9	1	2	9	4	2	3	3	8	7	9
Naxos	1	1	7	11	8	1	13	2	5	6	3	1	6	6	4	8	7
Syros	2	1	6	8	5	1	7	3	2	9	4	3	4	3	3	9	6
Mykonos	2	3	4	5	3	1	9	1	1	2	1	1	2	1	5	10	12
Tinos	7	8	2	4	2	1	8	1	1	2	1	1	2	1	4	11	11
Andros	5	6	2	2	2	1	9	2	6	7	1	2	1	3	4	12	16
Chios	1	1	6	7	8	3	8	10	2	2	1	1	8	2	3	13	4
Ikaria (Ag	3	4	3	10	7	5	9	1	1	7	4	3	8	1	2	14	3
Samos	1	2	4	5	6	1	7	4	2	1	3	4	5	1	6	15	9
Astypalea	0	3	4	5	2	6	1	6	7	8	9	2	3	4	5	16	0
Karpathos	3	0	8	5	2	4	5	6	7	8	2	3	1	4	5	17	1
Rhodes	4	8	0	8	7	3	9	4	5	6	7	4	4	1	1	18	6
Kos	5	5	8	0	4	5	5	6	2	1	2	3	4	1	5	19	6
Kalimnos	2	2	7	4	0	4	7	1	2	1	5	6	2	1	4	20	4
Skiros	6	4	3	5	4	0	4	2	3	4	5	6	7	8	9	21	2
Mytilene	1	5	9	5	7	4	0	3	4	5	6	7	8	2	9	22	11
Limnos (M	6	6	4	6	1	2	3	0	1	2	3	4	5	6	7	23	4
Amorgos	7	7	5	2	2	3	4	1	0	1	2	3	4	5	6	24	1
Sifnos	8	8	6	1	1	4	5	2	1	0	4	1	3	1	4	25	5
Serifos	9	2	7	2	5	5	6	3	2	4	0	2	3	4	5	26	3
Kythnos	2	3	4	3	6	6	7	4	3	1	2	0	1	2	3	27	12
Leros (La	3	1	4	4	2	7	8	5	4	3	3	1	0	1	3	28	2
Ios	4	4	1	1	1	8	2	6	5	1	4	2	1	0	4	29	1
Kastelorizo	5	5	1	5	4	9	9	7	6	4	5	3	3	4	0	30	3



Σχήμα 4.1: Μέτρο συνάρτησης ποινής για p=2 ανάλογα με τη χρονική διάρκεια της διαδρομής

4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΙ ΧΡΟΝΟΙ

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των επαναλήψεων, οι υπολογιστικοί χρόνοι, καθώς και η τυπική απόκλιση του συνόλου των δοκιμών που έγιναν για κάθε συνδυασμό. Ο συνδυασμός που δίνει κατά μέσο όρο τις καλύτερες τιμές είναι : πληθυσμός 50, συντελεστής διασταύρωσης 0.2 και συντελεστής μετάλλαξης 0.05. Οι διαδρομές που προκύπτουν από την καλύτερη λύση φαίνονται στο σχήμα 4.2. Οι διαφορετικοί συνδυασμοί των παραμέτρων δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα, με συναρτήσεις ικανότητας που διαφέρουν μέχρι και 12 μονάδες, ενώ ο αριθμός των διαδρομών δε διαφέρει σημαντικά.

Ο αλγόριθμος εκτελέστηκε σε επεξεργαστή 2,9 GHz με μνήμη RAM 4GB και οι υπολογιστικοί χρόνοι κυμαίνονται από 1,5 ως 17 λεπτά.

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα για διαφορετικούς συνδυασμούς των παραμέτρων του ΓΑ

ID	population	crossover	mutation	fitness	routes	unserved	Running time	Average fitness	Standard deviation
1A	50	0.2	0.05	51.05	11	0	13:17	51.48	0.64
B				50.72	12	0	11:08		
C				51.32	12	0	6:06		
D				52.56	12	0	3:53		
E				51.76	12	0	9:12		
2A	50	0.2	0.1	56.23	13	0	5.44	58.19	1.61
B				58.18	13	0	5.29		
C				58.31	13	2	3:21		
D				61.05	14	0	3:32		
E				57.19	13	0	2:32		
3A	50	0.2	0.15	55.12	13	1	8:15	58.41	2.64
B				57.35	13	0	4:15		

ID	population	crossover	mutation	fitness	routes	unserved	Running time	Average fitness	Standard deviation
C				56.86	13	1	6:02		
D				60.08	13	2	2:08		
E				62.62	14	1	1:44		
4A	50	0.4	0.05	53.69	12	1	9:23	51.20	2.43
B				51.24	12	1	13:57		
C				52.78	12	0	7:21		
D				61.02	13	0	2:30		
E				51.64	12	0	14:01		
5A	50	0.4	0.1	60.18	14	0	3:35	59.21	1.66
B				58.27	13	0	3:52		
C				62.027	14	2	3:48		
D				57.94	12	2	5:20		
E				57.64	12	0	6		
6A	50	0.4	0.15	58.15	12	2	2:30	57.47	0.80
B				55.92	13	0	4:09		
C				57.89	13	1	1:58		
D				57.85	12	2	6:36		
E				57.55	13	0	6:07		
7A	50	0.6	0.05	52.39	12	0	9:15	51.78	0.92
B				53.18	12	0	6:42		
C				50.54	12	0	12:04		
D				51.2	12	0	17:18		
E				51.59	12	0	9:02		
8A	50	0.6	0.1	56.5	13	0	6:50	58.74	1.72
B				59.67	13	0	3:43		
C				57.25	13	1	5:56		
D				61.33	14	1	1:41		
E				58.93	13	0	4:29		
9A	50	0.6	0.15	59.48	14	0	5:45	59.19	0.65
B				58.09	13	1	3:34		
C				59.66	13	1	3:54		
D				59.89	13	1	1:47		
E				58.85	13	3	2:59		
10A	75	0.2	0.05	54.95	12	1	3:59	52.97	1.13

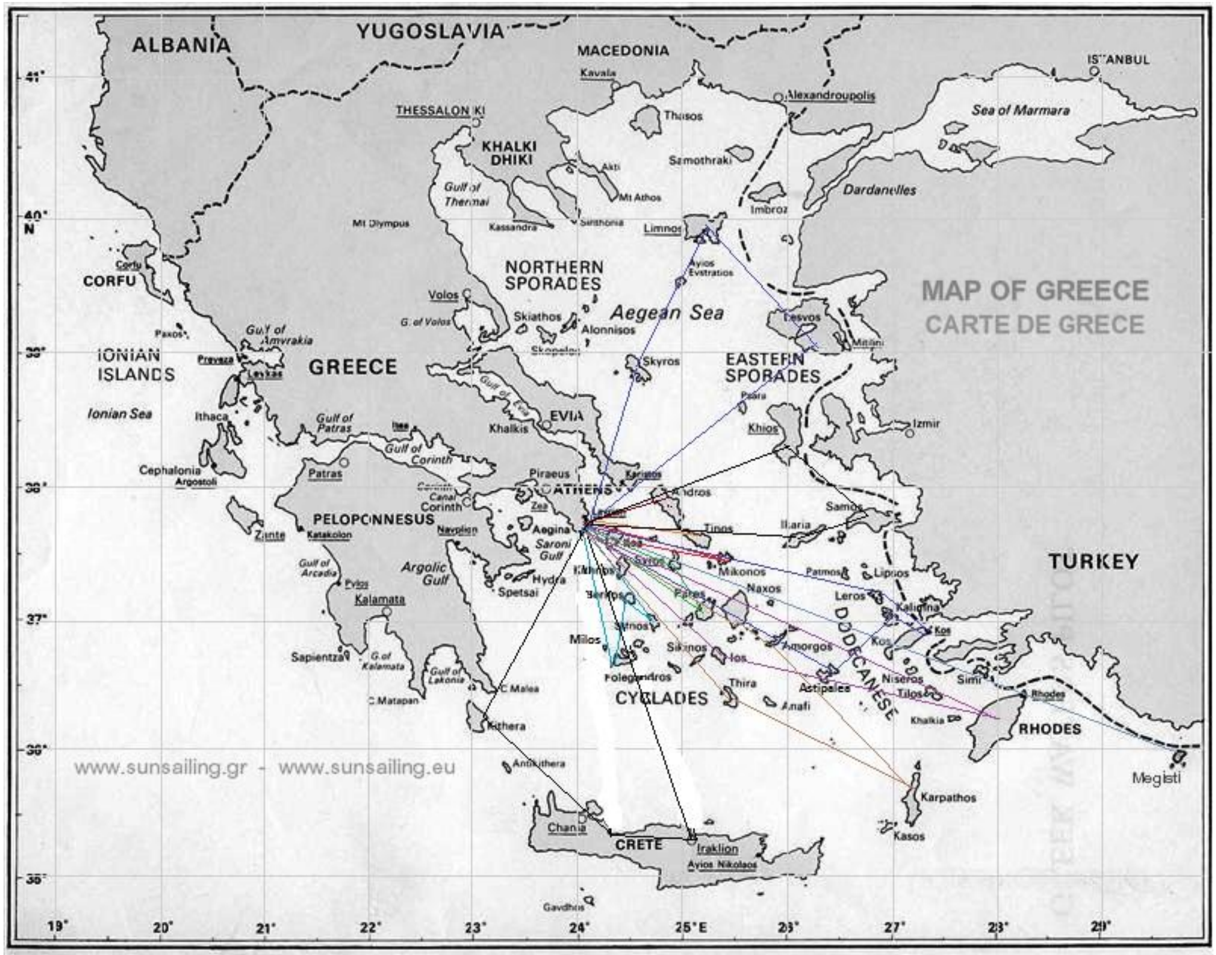
ID	population	crossover	mutation	fitness	routes	unserved	Running time	Average fitness	Standard deviation
B				52.63	12	0	7:51		
C				51.71	11	0	7		
D				52.19	12	0	6:34		
E				53.38	12	1	8:55		
11A	75	0.2	0.1	53.08	12	1	2:51	57.49	3.2
B				55.08	12	0	5:08		
C				60.89	13	4	3:18		
D				57.15	13	3	3:51		
E				61.25	14	3	2:15		
12A	75	0.2	0.15	60.72	13	4	5:49	59.44	1.96
B				57.68	13	0	3:25		
C				62.67	13	5	2:02		
D				57.62	13	1	3:35		
E				58.54	13	1	1:41		
13A	75	0.4	0.05	55.92	13	0	2:47	55.55	1.14
B				54.71	12	1	3:58		
C				55	12	1	3:10		
D				57.63	13	0	4:45		
E				54.52	12	0	6:28		
14A	75	0.4	0.1	60.97	13	3	3:02	61.21	2.03
B				59.97	13	1	3:40		
C				58.71	13	2	5:29		
D				64.76	13	5	2:43		
E				61.64	14	0	2:04		
15A	75	0.4	0.15	59.97	13	0	4:29	59.86	0.58
B				59.86	13	1	5:16		
C				58.97	13	2	3:41		
D				59.72	14	0	1:44		
E				60.78	14	1	2:55		
16A	75	0.6	0.05	54.62	13	0	8:48	53.82	0.89
B				53.28	12	0	7:17		
C				54.7	13	0	4:40		
D				54.12	13	0	5:06		
E				52.36	12	0	5:50		

ID	population	crossover	mutation	fitness	routes	unserved	Running time	Average fitness	Standard deviation
17A	75	0.6	0.1	62.49	13	2	3:31	60.01	2.13
B				57.56	13	0	6:24		
C				60.36	13	0	5:54		
D				62.08	13	3	7:03		
E				57.56	12	1	10:17		
18A	75	0.6	0.15	59.18	13	1	10:47	58.24	0.86
B				57.3	12	3	3:16		
C				57.1	13	0	8:20		
D				58.85	13	0	7:03		
E				58.77	13	1	4:31		
19A	100	0.2	0.05	52.65	12	0	5:33	53.90	1.35
B				52.62	12	0	2:57		
C				54.38	12	0	12:22		
D				53.6	12	0	8:27		
E				56.28	13	0	4:03		
20A	100	0.2	0.1	61.31	13	3	2:34	58.53	1.68
B				57.15	13	0	2:54		
C				56.46	12	1	8:15		
D				58.67	13	3	5:13		
E				59.04	13	1	2:27		
21A	100	0.2	0.15	60.09	13	3	2:51	58.75	0.98
B				59.57	13	0	5:09		
C				58.08	13	0	5:36		
D				57.38	12	2	2:08		
E				58.63	13	1	3:26		
22A	100	0.4	0.05	57.71	12	3	3:49	57.96	1.69
B				57.75	13	1	4:07		
C				61.17	12	4	2:33		
D				56.81	12	3	2:57		
E				56.364	13	0	3:44		
23A	100	0.4	0.1	59.65	14	0	3:48	60.44	1.26
B				60.18	14	0	6:04		
C				60.82	13	1	2:27		
D				58.91	14	1	6:52		

ID	population	crossover	mutation	fitness	routes	unserved	Running time	Average fitness	Standard deviation
E				62.62	14	1	2:48		
24A	100	0.4	0.15	60.29	13	2	2:29	60.14	1.74
B				61.72	13	3	1:51		
C				57.66	14	0	1:38		
D				62.27	13	5	3:23		
E				58.75	13	1	6:04		
25A	100	0.6	0.05	54.01	12	0	4:38	55.68	2.53
B				54.94	12	0	9:39		
C				59.89	14	1	2:01		
D				56.95	13	0	3:04		
E				52.61	12	0	4:06		
26A	100	0.6	0.1	60.01	13	1	2:32	59.51	1.54
B				58.38	13	0	2:03		
C				60.35	13	3	3:11		
D				57.23	12	2	4:52		
E				61.6	14	1	1:41		
27A	100	0.6	0.15	61.68	13	1	2:37	59.11	2.30
B				55.48	13	0	8:14		
C				59.85	13	0	3:53		
D				57.51	12	2	5:19		
E				61.02	12	6	3:12		

4.4 ΜΕΓΕΘΟΣ ΣΤΟΛΟΥ

Προκειμένου να ελαχιστοποιήσουμε το στόλο, θεωρούμε ότι υπάρχει η δυνατότητα ένα υδροπλάνο να εκτελεί μία διαδρομή, να επιστρέφει στο αρχικό λιμάνι (θεωρούμε χρόνο παραμονής 30 λεπτά) και να πραγματοποιεί έπειτα και άλλη διαδρομή. Αυτό συνεχίζεται μέχρι να μην είναι δυνατή η πραγματοποίηση άλλης διαδρομής, λόγω του χρονικού περιορισμού που ισχύει για τα υδροπλάνα, σύμφωνα με τον οποίο μπορούν να λειτουργήσουν μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επομένως, όταν η άφιξη του υδροπλάνου στο αρχικό λιμάνι γίνεται μετά τις 8 μ.μ. (χρονική στιγμή που τις περισσότερες ημέρες του καλοκαιριού δύει ο ήλιος), η τελευταία διαδρομή της ακολουθίας ανατίθεται σε επόμενο υδροπλάνο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ανατεθούν όλες οι διαδρομές σε κάποιο υδροπλάνο. Προκύπτει ότι χρειάζονται 4 υδροπλάνα για την πραγματοποίηση των διαδρομών, όπως αυτές έχουν προκύψει στη λύση με τη μικρότερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.



Σχήμα 4.2: Βέλτιστες Διαδρομές

Πίνακας 4.4: Διάρκεια διαδρομών και μέγεθος στόλου

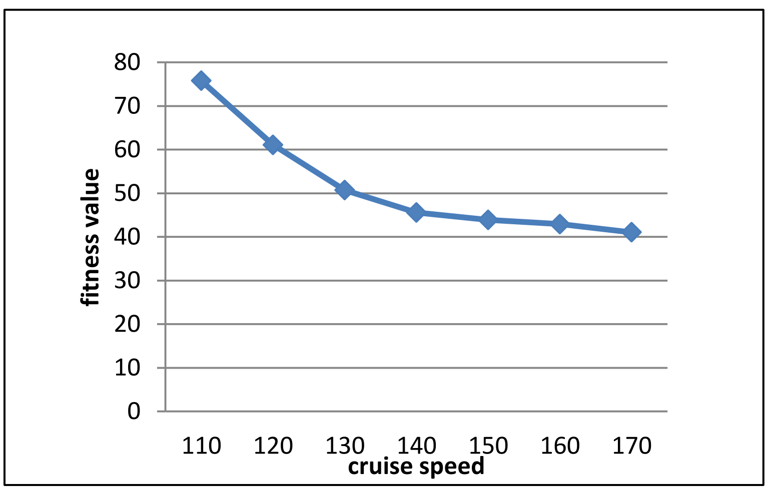
Διάρκεια (Σε ώρες)	Route ID	Υδροπλάνο	Αριθμός υδροπλάνων
4.07	1	1	4
4.96	2	1	
1.17	3	1	
2.25	4	2	
1.23	5	2	
4.77	6	2	
4.24	7	3	

Διάρκεια (Σε ώρες)	Route ID	Υδροπλάνο	Αριθμός υδροπλάνων
4.22	8	3	
1.8	9	3	
3.41	10	4	
1.78	11	4	
4.81	12	4	

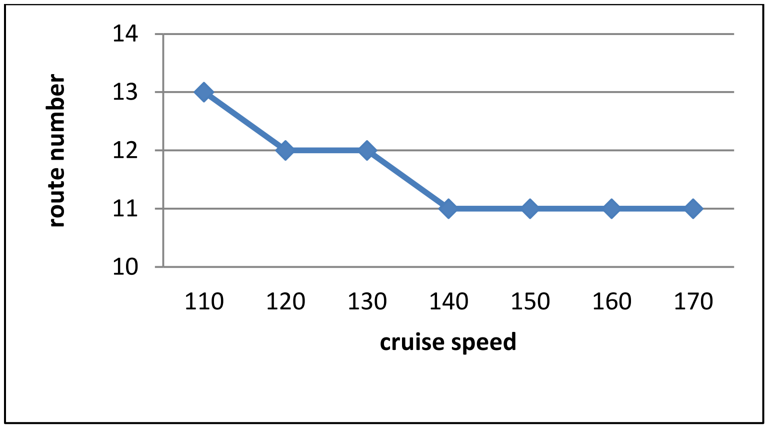
4.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας για την ταχύτητα του υδροπλάνου, το χρονικό όριο των διαδρομών, το συντελεστή p της συνάρτησης ποινής και τη χωρητικότητα του υδροπλάνου, διατηρώντας το συνδυασμό παραμέτρων που δίνει τη βέλτιστη λύση.

Όπως αναμενόταν, αύξηση της ταχύτητας πλεύσης οδηγεί σε μείωση της τιμής της συνάρτησης ικανότητας, αφού μειώνεται η διάρκεια των διαδρομών. Το ίδιο ισχύει και για τον αριθμό των διαδρομών, αφού οι μεγαλύτερες ταχύτητες επιτρέπουν την ένταξη περισσότερων νησιών στην ίδια διαδρομή, χωρίς υπέρβαση του ορίου των 5 ωρών. Ωστόσο, η μείωση αυτή δεν είναι σημαντική, καθώς ο περιορισμός χωρητικότητας είναι καθοριστικός παράγοντας για τον αριθμό των διαδρομών.

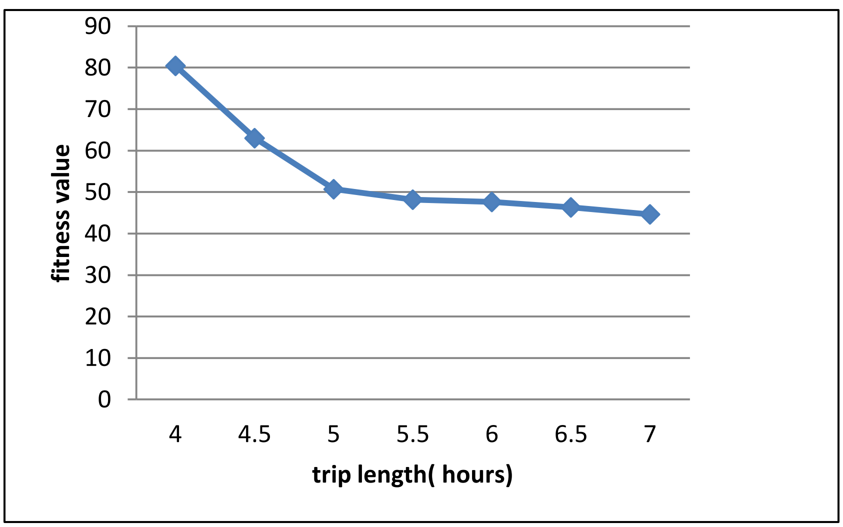


Σχήμα 4.3: Μεταβολή της συνάρτηση ικανότητας σε σχέση με την ταχύτητα πλεύσης

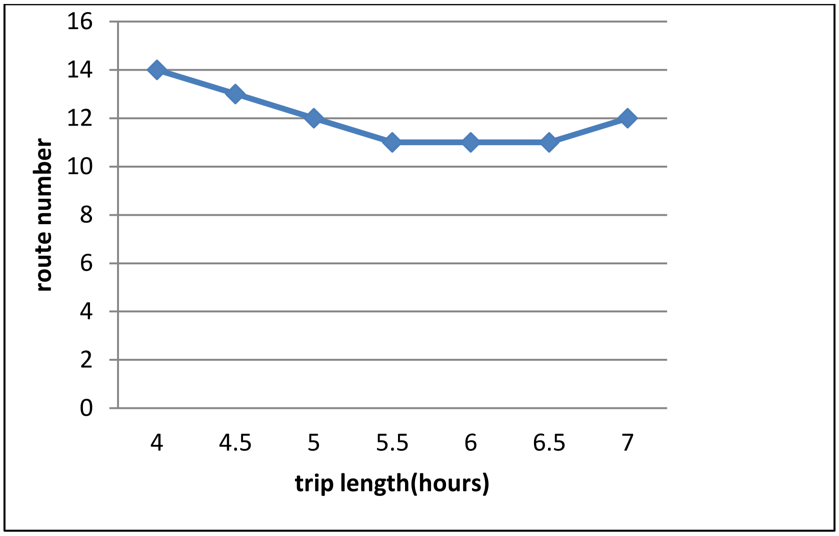


Σχήμα 4.4: Μεταβολή του αριθμού διαδρομών σε σχέση με την ταχύτητα πλεύσης

Από την ανάλυση ευαισθησίας ως προς το χρονικό όριο των διαδρομών προκύπτει επίσης, ότι όσο αυξάνεται το χρονικό όριο μειώνεται η τιμή της συνάρτησης ικανότητας. Ο αριθμός των διαδρομών μειώνεται γενικώς όσο αυξάνουν οι τιμές του ορίου, χωρίς να υπάρχει κάποια σταθερή σχέση, ενώ δεν μειώνεται κάτω από 11. Επομένως, και σε αυτή την περίπτωση φαίνεται πως η χωρητικότητα είναι εκείνη που επηρεάζει κυρίως τον αριθμό των διαδρομών.

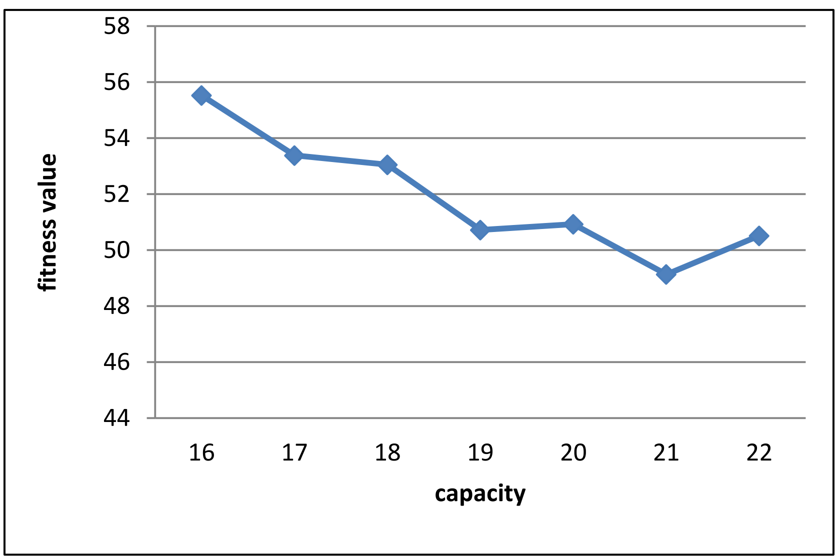


Σχήμα 4.5: Μεταβολή της συνάρτησης ικανότητας σε σχέση με το χρονικό όριο των διαδρομών

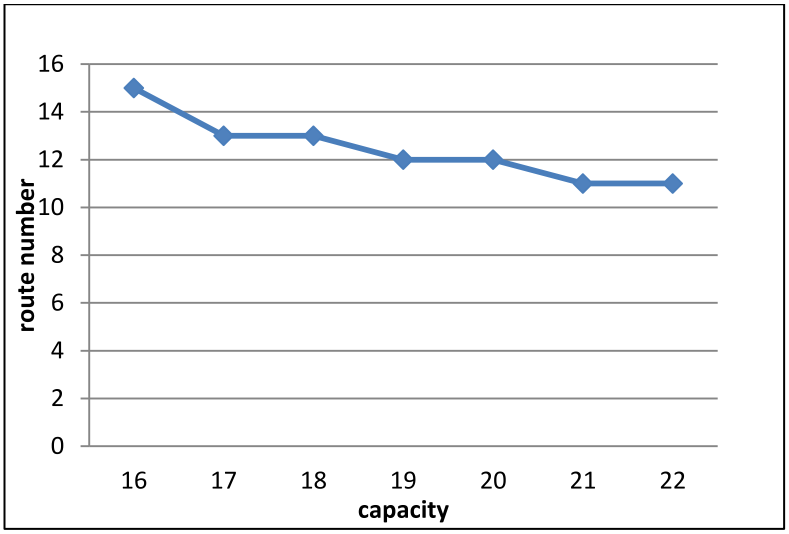


Σχήμα 4.6: Μεταβολή του αριθμού των διαδρομών σε σχέση με το χρονικό όριο των διαδρομών

Η ανάλυση ευαισθησίας ως προς τη χωρητικότητα του υδροπλάνου δείχνει ότι, όπως αναμενόταν, όσο αυξάνεται η χωρητικότητα, τόσο μειώνεται η τιμή της συνάρτησης ικανότητας. Το ίδιο ισχύει και για τον αριθμό των διαδρομών. Οι διαφορές στην τιμή ,ωστόσο, δεν είναι σημαντικές, ιδίως για τις τιμές πάνω από 19.

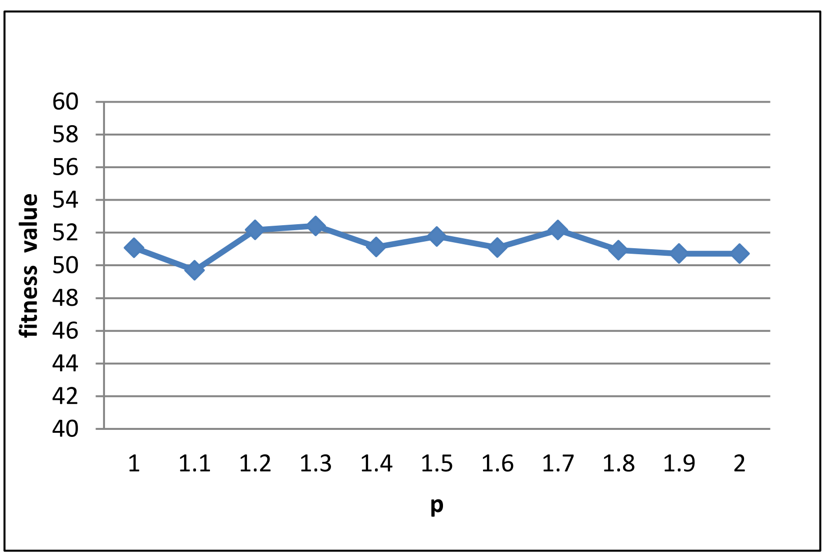


Σχήμα 4.7: Μεταβολή της συνάρτησης ικανότητας σε σχέση με τη χωρητικότητα

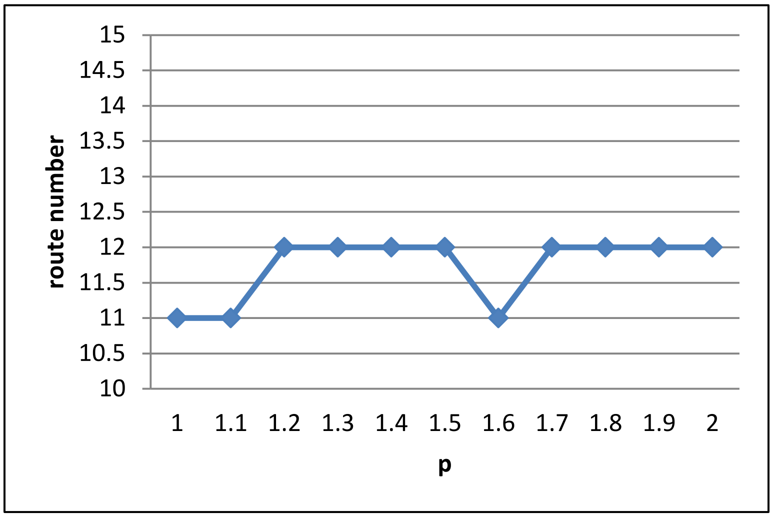


Σχήμα 4.8: Μεταβολή του αριθμού των διαδρομών σε σχέση με τη χωρητικότητα

Η ανάλυση ευαισθησίας για το συντελεστή της ποινής p επιβεβαιώνει ότι η αρχική μας επιλογή για p=2 οδηγεί στην απόρριψη των λύσεων με διαδρομές άνω των 5 ωρών, λειτουργώντας ουσιαστικά ως ανελαστικός περιορισμός. Παρατηρούμε ότι για τιμές του p κοντά στο 1 επιτρέπονται διαδρομές με διάρκεια ως και 6 ωρών, αυξάνοντας τη συνολική διάρκεια των διαδρομών και μειώνοντας κατά μία τον αριθμό τους, με αποτέλεσμα η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης να μην παρουσιάζει ουσιαστική διαφορά. Για μεγαλύτερες τιμές δεν σημειώνεται υπέρβαση του ορίου των 5 ωρών και η διακύμανση των αποτελεσμάτων είναι εντός των αναμενόμενων επιπέδων.



Σχήμα 4.9: Μεταβολή της συνάρτησης ικανότητας σε σχέση με το p



Σχήμα 4.10: Μεταβολή του αριθμού των διαδρομών σε συνάρτηση με το p

4.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.6.1 Παράμετροι του γενετικού αλγόριθμου

Από την εφαρμογή του αλγόριθμου προέκυψε ότι η επιλογή των παραμέτρων του γενετικού αλγόριθμου επηρεάζει σημαντικά την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Διαπιστώθηκε ότι, όπως αναφέρεται και στη βιβλιογραφία, το μέγεθος πληθυσμού 50 δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα για τέτοιας δυσκολίας προβλήματα. Επίσης, από την παρατήρηση της μεταβολής της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με τους συντελεστές διασταύρωσης και μετάλλαξης παρατηρείται ότι ο συντελεστής μετάλλαξης είναι καθοριστικής σημασίας και για τιμή 0.05 δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα, ενώ παρατηρείται σημαντική διαφορά στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για τις τιμές 0.1 και 0.15, ανεξάρτητα από τις τιμές των άλλων παραμέτρων. Τέλος, ο συντελεστής διασταύρωσης δίνει τις καλύτερες τιμές για τιμή 0.2.

4.6.2 Ανάλυση ευαισθησίας

Από την ανάλυση ευαισθησίας προκύπτει ότι η λύση που δίνει το πρόβλημα είναι ευαίσθητη ως προς τη χωρητικότητα, αλλά και τη χρονική διάρκεια που ορίζουμε για τις διαδρομές. Οι διαδρομές , δηλαδή, είτε διακόπτονται λόγω του περιορισμού χωρητικότητας, είτε του χρονικού ορίου. Για το λόγο αυτό, ο αριθμός των διαδρομών δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφορές όταν μεταβάλλουμε μία εκ των δύο αυτών παραμέτρων, αφού η επιρροή της άλλης είναι σημαντική.

Έτσι, ακόμα και όταν αυξηθεί σημαντικά η ταχύτητα πλεύσης με αποτέλεσμα να μπορούν να ενταχθούν περισσότερα νησιά σε μία διαδρομή, ο αριθμός των διαδρομών δε μειώνεται πολύ, όπως ίσως θα αναμενόταν, αφού ο περιορισμός χωρητικότητας οδηγεί στην ύπαρξη διαδρομών που περιλαμβάνουν πιθανώς μόνο ένα νησί.

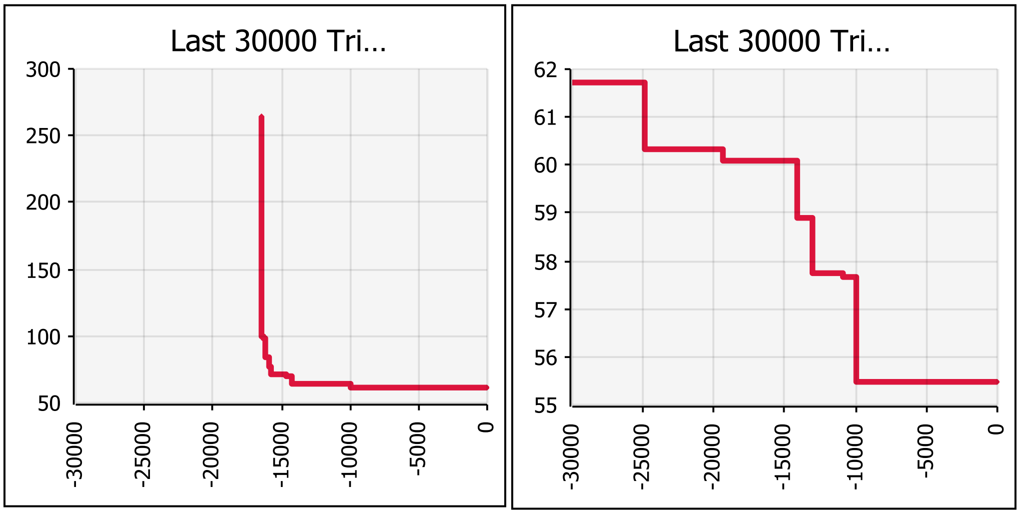
Ομοίως, η μεταβολή μόνο της χωρητικότητας δεν αρκεί για να αλλάξει σημαντικά το αποτέλεσμα της αντικειμενικής συνάρτησης, ωστόσο για τιμές μεγαλύτερες του 20 μειώνονται κατά μία οι διαδρομές.

Όσο για το χρονικό όριο που θέτουμε για τις διαδρομές, η αύξησή του οδηγεί σε μείωση της αντικειμενικής συνάρτησης, λόγω μείωσης της αθροιστικής διάρκειας των διαδρομών. Σε αυτή την περίπτωση, δηλαδή, επιτρέπονται ορισμένες διαδρομές που, αν και μεγαλύτερης διάρκειας, οδηγούν σε μικρότερο συνολικό κόστος. Λόγω του περιορισμού της χωρητικότητας και πάλι, ο αριθμός των διαδρομών δεν μειώνεται κάτω του 11.

Τέλος, σε ότι αφορά στη συνάρτηση ποινής, παρατηρήθηκε ότι για πολύ συγκεκριμένες τιμές του p επιτρέπεται η υπέρβαση του ορίου των 5 ωρών (λειτουργεί, δηλαδή, ως ελαστικός περιορισμός), ενώ για τις υπόλοιπες δεν παραβιάζεται το όριο που θέτουμε.

4.6.3 Σύγκλιση του αλγόριθμου

Παρατηρείται ότι οι παράμετροι που επιλέχθηκαν οδηγούν σε αποφυγή εγκλωβισμού σε τοπικό βέλτιστο, καθώς η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε διαφορετικές επαναλήψεις παρουσιάζει μικρή διακύμανση. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όμως, ο αλγόριθμος εγκλωβίζεται σε κάποιο τοπικό ελάχιστο, με αποτέλεσμα ακόμα και για τον ίδιο συνδυασμό παραμέτρων να υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Ο αλγόριθμος, δηλαδή, σε ορισμένες περιπτώσεις εντοπίζει μια «καλή», αλλά με σημαντική διαφορά από την ελάχιστη που έχει εντοπίσει σε άλλες δοκιμές, λύση σε μικρό χρονικό διάστημα ή, όπως λέγεται, συγκλίνει πρώιμα. Αυτό γίνεται εμφανές και από τα διαγράμματα προόδου. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διαφορά μεταξύ δύο λύσεων για μέγεθος πληθυσμού 100, συντελεστή διασταύρωσης 0.6 και συντελεστή μετάλλαξης 0.15. Στην πρώτη περίπτωση η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι 61.68 και απαιτήθηκαν 2 λεπτά και 37 δευτερόλεπτα, ενώ στη δεύτερη η τιμή της συνάρτησης είναι 55.48 και βρέθηκε σε 8 λεπτά και 14 δευτερόλεπτα.



Σχήμα 4.11: Σύγκριση μεταξύ διαφορετικών επαναλήψεων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 ΣΥΝΟΨΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολήθηκε με το βέλτιστο σχεδιασμό ενός δικτύου υδροπλάνων στο Αιγαίο πέλαγος. Το πρόβλημα διατυπώθηκε μαθηματικά, στοχεύοντας στην ελαχιστοποίηση του μεταφορικού χρόνου, του αριθμού των διαδρομών και του αριθμού των επιβατών που δεν εξυπηρετούνται μεταξύ των ενδιάμεσων νησιών. Λήφθηκαν υπόψη οι χρονικοί περιορισμοί που ισχύουν για τα υδροπλάνα (λειτουργία μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας), καθώς και η ανάγκη παροχής αποδεκτού επιπέδου εξυπηρέτησης των επιβατών, σύμφωνα με την οποία περιορίστηκαν σε χρονική διάρκεια οι διαδρομές. Για την επίλυση του προβλήματος εφαρμόσθηκε ένας γενετικός αλγόριθμος.

Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε αναλυτική ανασκόπηση των εργασιών που ασχολούνται με το σχεδιασμό δικτύου αερομεταφορών. Οι υπάρχουσες εργασίες διαχωρίστηκαν σε ντετερμινιστικές/στατικές και στοχαστικές/πιθανοτικές και παρουσιάστηκαν οι μαθηματικές διατυπώσεις, οι μέθοδοι επίλυσης και τα αποτελέσματα κάθε εργασίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύχθηκε η μεθοδολογική αντιμετώπιση του προβλήματος. Αρχικά, έγινε μια σύντομη εισαγωγή στο Πρόβλημα της Δρομολόγησης Οχημάτων και πιο συγκεκριμένα, στο Πρόβλημα με Ταυτόχρονη Παραλαβή και Διανομή, πάνω στο οποίο βασίστηκε η αντιμετώπιση της δρομολόγησης των υδροπλάνων. Στη συνέχεια, έγινε ανασκόπηση των μεθόδων οι οποίες αντιμετωπίζουν το πρόβλημα και δόθηκε η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος. Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε μια εισαγωγή στους γενετικούς αλγόριθμους, όπου επεξηγήθηκαν οι βασικές παράμετροι που εφαρμόζονται και παρουσιάστηκαν τα πλεονεκτήματα που έχει η χρήση γενετικών αλγόριθμων και συγκεκριμένα, οι λόγοι επιλογής για το πρόβλημα της παρούσας εργασίας. Τέλος, παρουσιάστηκαν τα χαρακτηριστικά του γενετικού αλγόριθμου που χρησιμοποιήθηκε για το πρόβλημα της δρομολόγησης των υδροπλάνων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο εφαρμόστηκε ο γενετικός αλγόριθμος στα δεδομένα του προβλήματος και αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος δημιουργίας διαδρομών. Έπειτα, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των δοκιμών και πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας για κάποιες παραμέτρους του προβλήματος.

Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διπλωματική εργασία και προτείνονται ορισμένα θέματα για περαιτέρω διερεύνηση.

5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί, στο βαθμό που γνωρίζουμε, την πρώτη εργασία που ασχολείται με το σχεδιασμό ενός δικτύου υδροπλάνων, παρουσιάζοντας μια λεπτομερή αντιμετώπιση του προβλήματος, η οποία λαμβάνει υπόψη τους λειτουργικούς περιορισμούς των οχημάτων, τις απαιτήσεις των επιβατών, καθώς και το οικονομικό συμφέρον των αερομεταφορέων.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο αλγόριθμος μπορεί να εφαρμοστεί για δημιουργία διαδρομών από μια εταιρεία για τη δρομολόγηση υδροπλάνων, καθώς ανταποκρίνεται σε ρεαλιστικές συνθήκες, ενώ απαιτεί σχετικά μικρό υπολογιστικό χρόνο. Εν γένει σχηματίζει διαδρομές μεταξύ κοντινών νησιών, για την πραγματοποίηση των οποίων επαρκεί ένας μικρός αριθμός υδροπλάνων. Παρατηρείται ότι στην πλειοψηφία των λύσεων ικανοποιείται πλήρως η ενδιάμεση ζήτηση μεταξύ διαδοχικών νησιών, κάτι που σημαίνει ότι είναι δυνατή με αυτό τον τρόπο η εξυπηρέτηση σημαντικά μεγαλύτερου αριθμού επιβατών και κατά συνέπεια, η αύξηση των εσόδων χωρίς κάποια πρόσθετη επιβάρυνση για τους φορείς.

Σε αντίθεση με άλλες προσεγγίσεις που περιλαμβάνουν πολυεπίπεδη βελτιστοποίηση, η συγκεκριμένη μέθοδος παράγει ικανοποιητικές λύσεις σε αποδεκτό χρόνο, αντιμετωπίζοντας άμεσα το πρόβλημα της δημιουργίας διαδρομών με βάση την επιβατική ζήτηση. Μπορεί, επίσης, να τροποποιηθεί ανάλογα με την επιθυμητή πολιτική, ώστε να λαμβάνει ή όχι υπόψη επιβάτες που δεν έχουν ως αφετηρία ή προορισμό το αρχικό λιμάνι. Τέλος, οι αποδεκτοί υπολογιστικοί χρόνοι επιτρέπουν πολλαπλές εκτελέσεις του αλγόριθμου για προσαρμογή του σε ρεαλιστικά δεδομένα.

5.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Στόχος της ενότητας αυτής είναι η πρόταση βελτιώσεων για τη συγκεκριμένη αλγοριθμική αντιμετώπιση που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία, αλλά και για την επέκταση του προβλήματος που αυτή αντιμετωπίζει, με την εισαγωγή διάφορων υποθέσεων που περιγράφονται παρακάτω.

5.3.1 Προτάσεις για βελτίωση των αποτελεσμάτων της παρούσας αντιμετώπισης

Αρχικά, θα ήταν ενδιαφέρον να εξεταστεί κατά πόσο η αρχική λύση επηρεάζει το αποτέλεσμα που δίνει ο αλγόριθμος, δεδομένου ότι στην παρούσα μέθοδο ο αρχικός πληθυσμός παράγεται τυχαία. Επομένως, θα ήταν σκόπιμο να κατασκευαστεί μια ευρετική μέθοδος για την παραγωγή της αρχικής λύσης και να ερευνηθεί αν και κατά πόσο βελτιώνονται η τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, αλλά και οι υπολογιστικοί χρόνοι.

Επιπροσθέτως, σε αντιστοιχία με το συμπέρασμα που διατυπώθηκε προηγουμένως σχετικά με την πρώιμη σύγκλιση του αλγόριθμου σε ορισμένες περιπτώσεις, θα ήταν σκόπιμο να συνδυαστεί ο γενετικός αλγόριθμος με μία άλλη μεταευρετική μέθοδο για την αντιμετώπιση του φαινομένου. Ενδεχομένως, μια μέθοδος τοπικής αναζήτησης ή προσομοιωμένης ανόπτησης να αποτελούσε καλή επιλογή, με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία (Toth and Vigo, 2002). Ακόμη, θα μπορούσε να εξεταστεί εάν μια δυναμική μεταβολή (ανατάραξη-perturbation) (Landrin-Schweitzer and Lutton, 2000) σε περιπτώσεις όπου η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης παραμένει σταθερή μετά από ορισμένο αριθμό επαναλήψεων (stagnation), θα συντελούσε στην αντιμετώπιση του προβλήματος. Επίσης, η αλλαγή του κριτηρίου διακοπής της διαδικασίας ενδεχομένως να αποτελούσε λύση για το συγκεκριμένο πρόβλημα, ωστόσο θα οδηγούσε, πιθανώς, και σε αύξηση του υπολογιστικού χρόνου, ακόμα και σε περιπτώσεις που δεν είναι αναγκαίο.

5.3.2 Προτάσεις για επέκταση του προβλήματος που αντιμετωπίστηκε

Στη συγκεκριμένη εργασία επιλύθηκε το πρόβλημα του σχεδιασμού των διαδρομών από το κομβικό λιμάνι του Λαυρίου προς ένα σύνολο 30 νησιών του Αιγαίου, με εξυπηρέτηση και ορισμένων τοπικών μετακινήσεων, δηλαδή επιβατών μεταξύ διαδοχικών νησιών της ίδιας διαδρομής. Με στόχο να καταστεί ακόμη πιο ρεαλιστικό, το πρόβλημα θα μπορούσε να επιλυθεί και με την εισαγωγή ορισμένων υποθέσεων, όπως:

- Η εξυπηρέτηση όλων των ενδιάμεσων επιβατών. Θα μπορούσε να λυθεί το πρόβλημα με την υπόθεση ότι είναι επιθυμητή η εξυπηρέτηση όλων των πιθανών ζευγών προέλευσης προορισμού σε μία διαδρομή. Βέβαια, σε αυτή την περίπτωση θα απαιτούνταν μια πιο πολύπλοκη διαδικασία, αφού θα έπρεπε να αντιμετωπιστεί και το πρόβλημα της ανάθεσης (fleet assignment problem).

- Η ύπαρξη περισσότερων του ενός κομβικών λιμανιών (multi-depot problem). Επίσης, θα ήταν ενδιαφέρον να επιλυθεί το συγκεκριμένο πρόβλημα για την περίπτωση πολλαπλών κομβικών λιμανιών, καθένα εκ των οποίων θα εξυπηρετούσε μια συγκεκριμένη περιοχή, ώστε να ελαχιστοποιείται η διανυόμενη απόσταση. Η θεώρηση αυτή θα μπορούσε να συνδυαστεί με την υπόθεση δυνατότητας μετεπιβιβάσεων, ώστε να εξυπηρετούνται όλα τα ζεύγη προέλευσης προορισμού.
- Η χρήση διαφορετικών μοντέλων υδροπλάνων ανάλογα με τη ζήτηση (heterogeneous vrp). Δεδομένης της αυξημένης ζήτησης για ορισμένα νησιά, θα μπορούσε να θεωρηθεί η ύπαρξη ενός μεικτού στόλου, αποτελούμενου από υδροπλάνα διαφορετικής χωρητικότητας. Με αυτό τον τρόπο θα ήταν δυνατή η χρήση μικρότερης χωρητικότητας υδροπλάνων για την εξυπηρέτηση των νησιών που χαρακτηρίζονται από μειωμένη ζήτηση. Θα ήταν σκόπιμο να ερευνηθεί κατά πόσο μια τέτοια θεώρηση θα ωφελούσε οικονομικά τους μεταφορείς.

Ολοκληρώνοντας, μία σημαντική κατεύθυνση όπου θα ήταν σκόπιμο να στραφεί η μελλοντική έρευνα αφορά στην αβεβαιότητα που υπεισέρχεται σε τέτοιου είδους προβλήματα. Το πρόβλημα θα μπορούσε να επιλυθεί με τη θεώρηση αβεβαιότητας στην επιβατική ζήτηση, τους χρόνους διαδρομής, τις καιρικές συνθήκες (τα υδροπλάνα εξαρτώνται από την ένταση του ανέμου) και σε άλλες παραμέτρους. Η δημιουργία στοχαστικών μοντέλων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την προσαρμογή του προβλήματος σε ρεαλιστικές συνθήκες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ai,T.J., and Kachitvichyanukul,V., 2009. “A Particle Swarm Optimization for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery.” *Computers and Operations Research* 36 (5): 1693–1702. doi:10.1016/j.cor.2008.04.003.

Alba, E., Dorronsoro,B., 2006. “Computing Nine New Best-so-far Solutions for Capacitated VRP with a Cellular Genetic Algorithm.” *Information Processing Letters* 98 (6) (June 30): 225–230. doi:10.1016/j.ipl.2006.02.006.

Armacost,A.P., Barnhart,C., and Ware,K.A., 2002. “Composite Variable Formulations for Express Shipment Service Network Design.” *Transportation Science* 36 (1) (February 1): 1–20. doi:10.1287/trsc.36.1.1.571.

Baker, B. M., Ayechew, M.A., 2003. “A Genetic Algorithm for the Vehicle Routing Problem.” *Computers & Operations Research* 30 (5) (April): 787–800. doi:10.1016/S0305-0548(02)00051-5.

Bell, M.G.H., Iida,Y., 1997. “TRANSPORTATION NETWORK ANALYSIS.” http://trid.trb.org/view.aspx?id=573501

Berger, J., Barkaoui,M., 2003. “A New Hybrid Genetic Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem.” *Journal of the Operational Research Society* 54 (12): 1254–1262. doi:10.1057/palgrave.jors.2601635.

Bianchessi,N., Righini,G., 2007. “Heuristic Algorithms for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-up and Delivery.” *Computers and Operations Research* 34 (2): 578–594. doi:10.1016/j.cor.2005.03.014.

Bjarnadottir, A.S., 2003, Solving the vehicle routing problem with genetic algorithms, Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, Denmark

Blickle, T., and Thiele, L., 1996. “A Comparison of Selection Schemes Used in Evolutionary Algorithms.” *Evolutionary Computation* 4 (4): 361–394.

Bryan,D.L., O’Kelly,M.E.,. 1999. “Hub-and-Spoke Networks in Air Transportation: An Analytical Review.” *Journal of Regional Science* 39 (2): 275–295. doi:10.1111/1467-9787.00134.

Chan,Y., 1974. “Configuring a Transportation Route Network via the Method of Successive Approximation.” *Computers & Operations Research* 1 (3): 385–420.

Chen, J.-F., Wu,T.-H., 2006. “Vehicle Routing Problem with Simultaneous Deliveries and Pickups.” *Journal of the Operational Research Society* 57 (5): 579–587. doi:10.1057/palgrave.jors.2602028.

Crispim,J., Brandão,J., 2005. “Metaheuristics Applied to Mixed and Simultaneous Extensions of Vehicle Routing Problems with Backhauls.” *Journal of the Operational Research Society* 56 (11): 1296–1302. doi:10.1057/palgrave.jors.2601935.

Current,J.R., 1988. “The Design of a Hierarchical Transportation Network with Transshipment Facilities.” *Transportation Science* 22 (4) (November 1): 270–277. doi:10.1287/trsc.22.4.270.

De Jong,K.A., 1975. “Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems.” http://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/4507.

Dell’Amico,M., Righini,G., Salani,M., “A Branch-and-price Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Distribution and Collection.”*Transportation Science* 2006 40:235-247.

Deng,J.L., 1982. “Grey System Fundamental Method”. Huazhong University of Science and Technology Wuhan, China.

Deng,J.L., 1989. “Introduction to Grey System Theory.” *J. Grey Syst.* 1 (1) (November): 1–24.

Dethloff,J., 2001. “Vehicle Routing and Reverse Logistics: The Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick-up.” *OR Spektrum* 23 (1): 79–96.

Gajpal,Y., Abad,P., 2009. “An Ant Colony System (ACS) for Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickup.” *Computers & Operations Research* 36 (12) (December): 3215–3223. doi:10.1016/j.cor.2009.02.017.

Gobbi, G., Smrcek,L., Galbraith,R., Lightening,B., Harbour Air Malta, Sträter,B., Sträter Consulting, Majka,M., 2013. “Report on Current Strength and Weaknesses of Existing Seaplane/amphibian Transport System as Well as Future Opportunities Including Workshop Analysis.” Accessed June 20. http://www.transport-research.info/Upload/Documents/201204/20120404_135706_22177_FUSETRA_D41_swot.pdf.

Goldberg, D.E., Richardson,J., 1987. “Genetic Algorithms with Sharing for Multimodal Function Optimization.” In *Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms on Genetic Algorithms and Their Application*, 41–49. Hillsdale, NJ, USA: L. Erlbaum Associates Inc. http://dl.acm.org/citation.cfm?id=42512.42519.

Golden,B.L., Raghavan,S., Wasil,E.A., 2008. *The Vehicle Routing Problem [electronic Resource]: Latest Advances and New Challenges*. Springer.

Griva, I., Nash,S.G., Sofer,A., 2009. *Linear and Nonlinear Optimization*. SIAM.

Holland,J., “Adaptation in Natural and Artificial Systems”, MIT press 1992

Holmberg, K., Hellstrand, 1998. “Solving the Uncapacitated Network Design Problem by a Lagrangean Heuristic and Branch-and-bound.” *Operations Research* 46 (2): 247–259.

Holmberg, K., Yuan,D., 2000. “A Lagrangian Heuristic Based Branch-and-bound Approach for the Capacitated Network Design Problem.” *Operations Research* 48 (3): 461–481.

Hsu,C-I., Wen,Y-H., 2000. “Application of Grey Theory and Multiobjective Programming Towards Airline Network Design.” *European Journal of Operational Research* 127 (1) (November 16): 44–68. doi:10.1016/S0377-2217(99)00320-3.

Huang,G.H., Baetz,B.W., and Patry,G.G., 1995. “Grey Integer Programming: An Application to Waste Management Planning Under Uncertainty.” *European Journal of Operational Research* 83 (3) (June 22): 594–620. doi:10.1016/0377-2217(94)00093-R.

Jaillet,P., Song,G., Yu,G., 1996. “Airline Network Design and Hub Location Problems.” *Location Science* 4 (3) (October): 195–212. doi:10.1016/S0966-8349(96)00016-2.

Jih,W-R., Hsu,J.,Y-J., 2013. “A FAMILY COMPETITION GENETIC ALGORITHM FOR THE PICKUP AND DELIVERY PROBLEMS WITH TIME WINDOW” Accessed June 9. http://www.eng.ntu.edu.tw/eng/chinese/bulletin/n90/n90-10.pdf.

Karlaftis, M.G., Kepaptsoglou,K., Sambracos,E., 2009. “Containership Routing with Time Deadlines and Simultaneous Deliveries and Pick-ups.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 45 (1): 210–221.

Kim, D., Barnhart,C., Ware,K., Reinhardt,G., 1999. “Multimodal Express Package Delivery: A Service Network Design Application.” *Transportation Science* 33 (4) (November 1): 391–407. doi:10.1287/trsc.33.4.391.

Landrin-Schweitzer, Y., Lutton,E., 2000. “Perturbation Theory for Evolutionary Algorithms: Towards an Estimation of Convergence Speed.” In *Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI*, edited by Marc Schoenauer, Kalyanmoy Deb, Günther Rudolph, Xin Yao, Evelyne Lutton, Juan Julian Merelo, and Hans-Paul Schwefel, 109–118. Lecture Notes in Computer Science 1917. Springer Berlin Heidelberg. http://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-45356-3_11.

Lenstra,J.K., Kan,A.H.G., 1981. “Complexity of Vehicle Routing and Scheduling Problems.” *Networks* 11 (2): 221–227.

Lin,C-C., 2001. “The Freight Routing Problem of Time-definite Freight Delivery Common Carriers.” *Transportation Research Part B: Methodological* 35 (6) (July): 525–547. doi:10.1016/S0191-2615(00)00008-4.

Lin, C-C., Chen,S-H., 2004. “The Hierarchical Network Design Problem for Time-definite Express Common Carriers.” *Transportation Research Part B: Methodological* 38 (3) (March): 271–283. doi:10.1016/S0191-2615(03)00013-4.

Lin,C-C., Chen,S-H., 2008. “An Integral Constrained Generalized Hub-and-spoke Network Design Problem.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 44 (6): 986–1003.

Lin,C-C., LinY-J., Lin,D-Y., 2003. “The Economic Effects of Center-to-center Directs on Hub-and-spoke Networks for Air Express Common Carriers.” *Journal of Air Transport Management* 9 (4) (July): 255–265. doi:10.1016/S0969-6997(03)00019-X.

Magnanti,T.L., Mirchandani,P., and Vachani,R., 1995. “Modeling and Solving the Two-facility Capacitated Network Loading Problem.” *Operations Research* 43 (1): 142–157.

Magnanti,T.L., Mireault,P., Wong,R.T., 1986. *Tailoring Benders Decomposition for Uncapacitated Network Design*. Springer. http://link.springer.com/chapter/10.1007/BFb0121090.

Magnanti,T.L., Wong,R.T., 1984. “Network Design and Transportation Planning: Models and Algorithms.” *Transportation Science* 18 (1): 1–55.

Michalewicz, Z., 1992. “*Genetic algorithms +data structures =evolution programs*, ” Springer–Verlag, 2nd ed.

Minoux,M., 1989. “Networks Synthesis and Optimum Network Design Problems: Models, Solution Methods and Applications.” *Networks* 19 (3): 313–360.

Minoux,M., 2001. “Discrete Cost Multicommodity Network Optimization Problems and Exact Solution Methods.” *Annals of Operations Research* 106 (1-4) (September 1): 19–46. doi:10.1023/A:1014554606793.

Montané,F.A.T., Galvão,R.D., 2006. “A Tabu Search Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-up and Delivery Service.” *Computers & Operations Research* 33 (3) (March): 595–619. doi:10.1016/j.cor.2004.07.009.

Nagy,G., Salhi,S., 2005. “Heuristic Algorithms for Single and Multiple Depot Vehicle Routing Problems with Pickups and Deliveries.” *European Journal of Operational Research* 162 (1): 126–141. doi:10.1016/j.ejor.2002.11.003.

Pankratz,G., 2005. “A Grouping Genetic Algorithm for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows.” *OR Spectrum* 27 (1): 21–41.

Prins, C., 2004. “A Simple and Effective Evolutionary Algorithm for the Vehicle Routing Problem.” *Computers & Operations Research* 31 (12): 1985–2002.

Rothlauf,F.,2006. “ *Representations for Genetic and Evolutionary Algorithms*” **,** Springer

Sáez,D.,Cortés,C.E., Núñez,A., 2008. “Hybrid Adaptive Predictive Control for the Multi-vehicle Dynamic Pick-up and Delivery Problem Based on Genetic Algorithms and Fuzzy Clustering.” *Computers & Operations Research* 35 (11): 3412–3438.

Shier, D. R., 1976. “Iterative Methods for Determining the k Shortest Paths in a Network.” *Networks* 6 (3): 205–229. doi:10.1002/net.3230060303.

Sridhar, V., Park,J.S., 2000. “Benders-and-cut Algorithm for Fixed-charge Capacitated Network Design Problem.” *European Journal of Operational Research* 125 (3): 622–632.

Taylor,C., De Weck,O.L., 2006. “Integrated Transportation Network Design Optimization.” http://spacelogistics.mit.edu/pdf/AIAA-2006-1912-328.pdf.

Teodorović,D., Kalić,M., Pavković,G., 1994. “The Potential for Using Fuzzy Set Theory in Airline Network Design.” *Transportation Research Part B: Methodological* 28 (2) (April): 103–121. doi:10.1016/0191-2615(94)90020-5.

Toth,P., Vigo,D., 2002. *The Vehicle Routing Problem*. SIAM.

Wassan,N.A., Wassan,A.H., Nagy,G., 2007. “A Reactive Tabu Search Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickups and Deliveries.” *Journal of Combinatorial Optimization* 15 (4) (June 8): 368–386. doi:10.1007/s10878-007-9090-4.

Yan,S., Tseng,C-H., 2002. “A Passenger Demand Model for Airline Flight Scheduling and Fleet Routing.” *Computers & Operations Research* 29 (11): 1559–1581.

Zachariadis,E.E., Kiranoudis,C.T., 2011. “A Local Search Metaheuristic Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-ups and Deliveries.” *Expert Syst. Appl.* 38 (3) (March): 2717–2726. doi:10.1016/j.eswa.2010.08.061.

Zachariadis,E.E., Tarantilis,C.D., Kiranoudis,C.T., 2009. “A Hybrid Metaheuristic Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick-up Service.” *Expert Systems with Applications* 36 (2, Part 1) (March): 1070–1081. doi:10.1016/j.eswa.2007.11.005.

Zachariadis,E.E., Tarantilis,C.D., Kiranoudis,C.T., 2010. “An Adaptive Memory Methodology for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-ups and Deliveries.” *European Journal of Operational Research* 202 (2) (April 16): 401–411. doi:10.1016/j.ejor.2009.05.015.

Zadeh,L., 1965. “Fuzzy Sets.” *Information and Control* 8 (3) (June): 338–353. doi:10.1016/s0019-9958(65)90241-x.

Γεωργόπουλος,Ε.Φ., Λυκοθανάσης,Σ.Δ., 1999. “*Εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγορίθμους* ”, Πανεπιστήμιο Πατρών,Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών & Πληροφορικής

Καρλαύτης,Μ.Γ., Λαγαρός, Ν.Δ., 2010. *Επιχειρησιακή Έρευνα και Βελτιστοποίηση για Μηχανικούς*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΚΩΔΙΚΑΣ VISUAL BASIC

```
Sub renumb()
For i = 1 To 30
        Worksheets("data").Cells(i + 1, 1).Value = i
    Worksheets("data").Cells(i + 1, 2).Value = ""
    Worksheets("data").Cells(i + 1, 3).Value = ""
Next i
End Sub
Sub stinipop()
Dim a(30), b(30), c(30) As Integer
For i = 1 To 30
        a(i) = i
    b(i) = 0
    Next i
k = 1
While k <= 30
    d = Int(30 * Rnd() + 1)
    For i = 1 To 30
          If (a(i) = d 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 31
             Worksheets("data").Cells(i, 1).Value = c(i - 1)
           Next i
End Sub
Sub getroutes()
Dim st(30) As Single, dd(30, 30) As Single, d0(30) As Single, d31(30) As Single, unserv(29) As Integer
Dim an(30), ind(30) As Integer, tb(30) As Single, srpos()
```

```
For i = 2 To 31
getnew = Worksheets("data").Cells(i, 1).Value
  For j = 39 To 68
            check = Worksheets("data").Cells(j, 1).Value
               If check = getnew Then
                            an(i - 1) = Worksheets("data").Cells(j, 1).Value
                            st(i - 1) = Worksheets("data").Cells(j, 6).Value
                            tb(i - 1) = Worksheets("data").Cells(j, 7).Value
                            d0(i - 1) = Worksheets("demand2").Cells(j - 37, 1).Value
                            d31(i - 1) = Worksheets("demand2").Cells(j - 37, 34).Value
                              End If
        Next j
       Next i
'setting index and subroutes
cap = Worksheets("data").Cells(73, 1).Value
tot0 = 0
tot31 = 0
tot02 = 0
tot312 = 0
Total = 0
rtnum = 1
stopit = 0
i = 1
While Not stopit = 1
tot0 = tot0 + d0(i)
tot31 = tot31 + d31(i)
tot02 = tot02 + d0(i)
tot312 = tot312 + d31(i)
Total = tot02 + tot31 - d31(i) - (tot0 - d0(i))
If tot02 >= Total Then maxtot1 = tot02 Else maxtot1 = Total
If maxtot1 >= tot312 Then MAXTOT = maxtot1 Else MAXTOT = tot312
If MAXTOT < cap Then
free = cap - Total
ind(i) = rtnum
 If i > 1 Then
        If ind(i) = ind(i - 1) Then
         interm = Worksheets("demand2").Cells((an(i - 1) + 1), (an(i) + 2)).Value
             If interm >= free Then
                 Worksheets("data").Cells(i, 7).Value = free
                 unserv(i - 1) = interm - free
                Worksheets("data").Cells(i, 8).Value = unserv(i - 1)
```

```
            Else
            Worksheets("data").Cells(i, 7).Value = interm
            unserv(i - 1) = 0
            Worksheets("data").Cells(i, 8).Value = unserv(i - 1)
          End If
        Else
          Worksheets("data").Cells(i, 7).Value = 0
          unserv(i - 1) = 0
          Worksheets("data").Cells(i, 8).Value = unserv(i - 1)
        End If
      End If
              i = i + 1
    End If
If MAXTOT = cap Then
free = cap - Total
ind(i) = rtnum
 If i > 1 And free > 0 Then
   If ind(i) = ind(i - 1) Then
      interm = Worksheets("demand2").Cells((an(i - 1) + 1), (an(i) + 2)).Value
      If interm >= free Then
      Worksheets("data").Cells(i, 7).Value = free
       unserv(i - 1) = interm - free
      Worksheets("data").Cells(i, 8).Value = unserv(i - 1)
      Else
      Worksheets("data").Cells(i, 7).Value = interm
      unserv(i - 1) = 0
       Worksheets("data").Cells(i, 8).Value = unserv(i - 1)
      End If
   Else
      Worksheets("data").Cells(i, 7).Value = 0
      unserv(i - 1) = 0
       Worksheets("data").Cells(i, 8).Value = unserv(i - 1)
    End If
   End If
              rtnum = rtnum + 1
              tot0 = 0
              tot31 = 0
              tot02 = 0
              tot312 = 0
              Total = 0
              i = i + 1
```

```
            End If

    If MAXTOT > cap Then
            rtnum = rtnum + 1
            ind(i) = rtnum
            tot0 = 0
            tot31 = 0
            tot02 = 0
            tot312 = 0
            Total = 0
             End If

    If i > 30 Then stopit = 1

    Wend

    Worksheets("data").Cells(2, 6).Value = rtnum
    For i = 1 To 30
          Worksheets("data").Cells(i + 1, 2).Value = ind(i)
       Next i
    For i = 1 To 30
    a = Worksheets("data").Cells(i + 1, 1).Value
       For j = 39 To 68
             If a = Worksheets("data").Cells(j, 1).Value Then Worksheets("data").Cells(i + 1,
3).Value = Worksheets("data").Cells(j, 8).Value
             Next j
       Next i
    End Sub
    Function TotalCost(value1) As Single
    Dim st(30) As Single, dd(30) As Single, pen() As Double, d0(30) As Single, d31(30) As
Single, unserv(29) As Integer
    Dim an(30), ind(30) As Integer, tb(30) As Single, ss(30) As Single, srpos(), tot99() As
Single
    For i = 2 To 31
    getnew = Worksheets("data").Cells(i, 1).Value
       For j = 39 To 68
          check = Worksheets("data").Cells(j, 1).Value
              If check = getnew Then
                     an(i - 1) = Worksheets("data").Cells(j, 1).Value
                     st(i - 1) = Worksheets("data").Cells(j, 6).Value
                     tb(i - 1) = Worksheets("data").Cells(j, 7).Value
```

```
                    d0(i - 1) = Worksheets("demand2").Cells(j - 37, 1).Value
                    d31(i - 1) = Worksheets("demand2").Cells(j - 37, 34).Value
                              End If
        Next j
Next i
'setting index and subroutes
cap = Worksheets("data").Cells(73, 1).Value
tot0 = 0
tot31 = 0
tot02 = 0
tot312 = 0
Total = 0
rtnum = 1
stopit = 0
i = 1
ID = 1
While Not stopit = 1
tot0 = tot0 + d0(i)
tot31 = tot31 + d31(i)
tot02 = tot02 + d0(i)
tot312 = tot312 + d31(i)

Total = tot02 + tot31 - d31(i) - (tot0 - d0(i))

If tot02 >= Total Then maxtot1 = tot02 Else maxtot1 = Total
If maxtot1 >= tot312 Then MAXTOT = maxtot1 Else MAXTOT = tot312
If MAXTOT < cap Then
free = cap - Total
ind(i) = rtnum
 If i > 1 Then
        If ind(i) = ind(i - 1) Then
         interm = Worksheets("demand2").Cells((an(i - 1) + 1), (an(i) + 2)).Value
            If interm >= free Then
                  unserv(i - 1) = interm - free
                          Else
                        unserv(i - 1) = 0
                End If
           Else
              unserv(i - 1) = 0
               End If
     End If
```

```
                    i = i + 1
                     End If

If MAXTOT = cap Then
free = cap - Total
ind(i) = rtnum
 If i > 1 And free > 0 Then
    If ind(i) = ind(i - 1) Then
        interm = Worksheets("demand2").Cells((an(i - 1) + 1), (an(i) + 2)).Value
        If interm >= free Then

         unserv(i - 1) = interm - free
               Else
               unserv(i - 1) = 0
               End If
      Else
        unserv(i - 1) = 0
         End If
    End If
                          rtnum = rtnum + 1
                    tot0 = 0
                    tot31 = 0
                    tot02 = 0
                    tot312 = 0
                    Total = 0
                    i = i + 1
                    ID = i
                    End If

If MAXTOT > cap Then
                    rtnum = rtnum + 1
                    ind(i) = rtnum
                    tot02 = 0
                    tot312 = 0
                    Total = 0
                    tot0 = 0
                    tot31 = 0
                    ID = i
                    End If
        If i > 30 Then stopit = 1
Wend
```

```
For i = 1 To 30
Next i
ReDim srpos(rtnum + 1), pen(rtnum)
counter = 0
ind(0) = 0
For i = 1 To 30
    If ind(i - 1) < ind(i) Then
                        counter = counter + 1
                        srpos(counter) = i
                        rtnum = counter
                       End If
Next i
srpos(rtnum + 1) = 31
tot = 0
ReDim tot99(rtnum + 1)
p = Sheet1.Cells(2, 5).Value
For i = 1 To rtnum
a = srpos(i)
b = srpos(i + 1) - 1
    dist = 0
    dist0a = tb(a)
    distb0 = tb(b)
   For j = a To b – 1
      dist = dist + Worksheets("data").Cells(78 + an(j), 1 + an(j + 1)).Value + st(j)
        'Debug.Print "dist" + CStr(dist)
         Next j
tot99(i) = dist + st(b) + dist0a + distb0
 pen(i) = tot99(i) - 5
Next i
For k = 1 To rtnum
If pen(k) > 0 Then tot99(k) = tot99(k) * p * Exp(pen(k))
    tot = tot + tot99(k)
Next k
un = 0
For i = 1 To 29
un = un + unserv(i)
Next i
TotalCost = tot + un + rtnum
End Function
```