



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

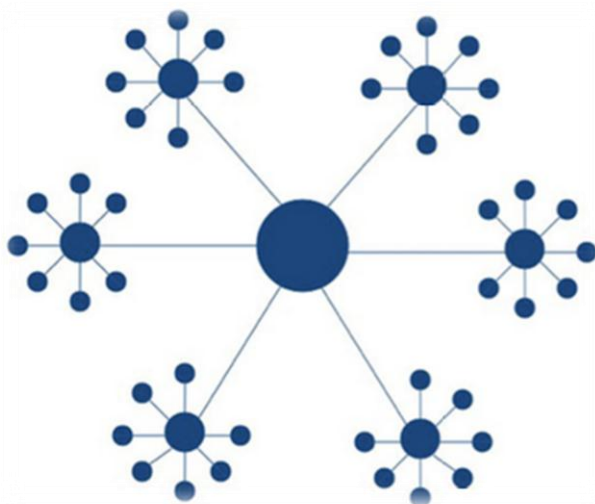
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΚΤΟΠΛΟΪΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΤΟ
ΠΛΑΙΣΙΟ HUB&SPOKE ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ ΠΕΛΑΓΟΥΣ**

Δημήτριος Σβορώνος

Επιβλέπων: Δημήτριος Β. Λυρίδης
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.



ΑΘΗΝΑ, Ιούνιος 2018

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλλαν στην επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Δημήτρη Λυρίδη για το ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα που μου πρότεινε καθώς και για την επίβλεψη της εν λόγω εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Κώστα Κεπαπτσόγλου για την καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας καθώς και για τις καίριες παρατηρήσεις και επισημάνσεις του σε όλα τα στάδια εκπόνησής της. Επιπλέον, θέλω να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στην υποψήφια διδάκτορα ΕΜΠ Χριστίνα Ηλιοπούλου για την καθοριστική βοήθεια της. Ευχαριστώ ιδιαίτερω επίσης, το φίλο μου Τάσο Χαρίση, για τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε και για τις ουσιαστικές παρατηρήσεις του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά όλους τους φίλους και φίλες μου, ιδιαίτερα τον Γρηγόρη Φυλαχτό και τον Παναγιώτη Δημητριάδη (Καρρά) που δίχως τη βοήθεια τους δε θα είχα εκπληρώσει το στόχο μου. Όπως φυσικά και την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση και στήριξή τους, που με συνοδεύει από την αρχή των σπουδών μου.

Ιούνιος 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο το σχεδιασμό ενός ακτοπλοϊκού δικτύου μεταφοράς επιβατών στο πλαίσιο ενός Hub&Spoke συστήματος. Με τη χρήση νέων τεχνολογιών και μεθόδων που εντάσσονται στην επιστήμη της Επιχειρησιακής Έρευνας δίνεται η δυνατότητα μελέτης του εν λόγω προβλήματος, καθώς η λειτουργία ενός συστήματος “Hub&Spoke” στον Ελλαδικό χώρο για τη μεταφορά επιβατών είναι ένα αρκετά σημαντικό αντικείμενο προς μελέτη και έρευνα. Στη συγκεκριμένη εργασία επομένως αναλύεται το εν λόγω πρόβλημα σε τρία υπο-πρόβλημα διατυπώνοντας τα αντίστοιχα μαθηματικά πρότυπα. Αρχικά επιλύεται το πρόβλημα της εύρεσης των κατάλληλων Hubs, έπειτα το πρόβλημα της δρομολόγησης των απαιτούμενων πλοίων από τα Hubs προς τα αντίστοιχα Spokes και τέλος στη δρομολόγηση της κεντρικής διαδρομής. Για τη δρομολόγηση των μικρότερων πλοίων από τα Hubs προς τα Spokes, εφαρμόζεται ένας γενετικός αλγόριθμος μέσω του οποίου παράγονται διαδρομές που ικανοποιούν τη ζήτηση, λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένους περιορισμούς στη χωρητικότητα. Το μεθοδολογικό πλαίσιο που αναπτύχθηκε εφαρμόστηκε για μια περιοχή μελέτης που περιλαμβάνει 30 λιμάνια της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου Πελάγους για τρεις περιπτώσεις πλήθους Hubs. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν συγκρίθηκαν για τις τρεις αυτές περιπτώσεις και στη συνέχεια οπτικοποιήθηκαν στους αντίστοιχους χάρτες. Τέλος, σημαντικά συμπεράσματα εξήχθησαν τόσο για τους αλγόριθμους που παράγουν λογικά αποτελέσματα σε μικρούς υπολογιστικούς χρόνους, επιτρέποντας έτσι τη δημιουργία διαδρομών ανάλογα με τη ζήτηση, όπως υπαγορεύεται από καθημερινά πρότυπα, όσο και για την εφαρμογή ενός λειτουργικού και αποδοτικού συστήματος Hub&Spoke για την μεταφορά επιβατών.

Λέξεις κλειδιά: δρομολόγηση, χωροθέτηση, ακτοπλοΐα, γενετικός αλγόριθμος, επιχειρησιακή έρευνα

ABSTRACT

This study deals with the design of a Hub&Spoke network in order to efficient transport passengers to multiple destinations. The use of new technologies and methods in the field of Operational Research gives the opportunity to study this problem, as it must be admitted that a Hub&Spoke network system is a very important subject for research for passengers in Greece. Therefore, this problem is being analyzed into three sub-problems by also formulating the corresponding mathematical models. First of all, the problem of Hub Location-Allocation is solved, then the problem of routing of fleet from the Hubs to the Spokes and subsequently the routing of the central route are solved. A genetic algorithm is applied to the problem of routing from Hubs to Spokes, taking into account specific demands and capacity constraints. The methodology context was applied in a case study of 30 ports belonging in Aegean region for three different cases of the number of Hubs. Moreover, useful results were exported, compared and then visualized on maps. Finally, notable conclusions were extracted for the algorithms which are able to produce results in short computational times, thus allowing for the creation of on-demand routes as dictated by daily standards, but also for the application of a functional and efficiently Hub&Spoke network for passenger transport.

Key words: hub, spoke, routing, hub-location, shipping, genetic algorithm, operational research

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	II
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	III
ABSTRACT	IV
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.1 Γενική τοποθέτηση του προβλήματος.....	9
1.2 Σκοπός μελέτης	9
1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ	13
2.1 Ελληνική Ακτοπλοΐα.....	13
2.2 Σχεδιασμός δικτύου μεταφορών	15
2.3 Σύστημα Hub & Spoke.....	15
2.3.1 Σύστημα Hub & Spoke στην Ελληνική Ακτοπλοΐα	17
2.4 Hub Location-Allocation.....	18
2.4.1 Single Hub Location Problem (O’ Kelly 1987).....	19
2.4.2 P-Hub Location Problem (O’ Kelly 1987)	20
2.4.3 P-Hub Center Location Problem (Campbell 1994)	20
2.5 Προβλήματα δικτύου μεταφορών - Vehicle Routing Problem	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	24
3.1 Μαθηματικό πρότυπο.....	24
3.1.1 Hub Location-Allocation Problem	25
3.1.2 Vehicle Routing Problem – Hub to Spokes.....	26
3.1.3 Vehicle Routing Problem - Hub to Hub	29
3.2 Περιβάλλον υλοποίησης μοντέλων	30
3.3 Γενετικοί αλγόριθμοι.....	32
3.3.1 Κωδικοποίηση της λύσης	33
3.3.2 Καταρτισμός αρχικού πληθυσμού (Αρχικοποίηση)	33
3.3.3 Αποτίμηση πληθυσμού μέσω συνάρτησης ικανότητας.....	34
3.3.4 Επιλογή.....	34
3.3.5 Διασταύρωση.....	36
3.3.6 Μετάλλαξη	37
3.3.7 Διάγραμμα ροής τυπικού γενετικού αλγορίθμου	37
3.3.8 Πλεονεκτήματα γενετικών αλγορίθμων	39
3.4 Εφαρμογή Γενετικού Αλγορίθμου	40

3.4.1 Χαρακτηριστικά γενετικού αλγορίθμου	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΦΑΡΜΟΓΗ	44
4.1 Περιοχή μελέτης.....	44
4.2 Δεδομένα εφαρμογής	49
4.2.1 Παράμετροι του γενετικού αλγορίθμου.....	50
4.3 Εφαρμογή-Αποτελέσματα για περίπτωση δύο(2) Hub	50
4.3.1 Αποτελέσματα Hub Location-Allocation για πλήθος Hub=2	50
4.3.2 Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου.....	51
4.3.3 Αποτελέσματα Hub-to-Hub Routing.....	59
4.3.4 Συνολικά αποτελέσματα δικτύου	60
4.4 Εφαρμογή-Αποτελέσματα για περίπτωση τριών (3) Hub	61
4.4.1 Αποτελέσματα Hub Location-Allocation για πλήθος Hub=3	61
4.4.2 Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου.....	61
4.4.3 Αποτελέσματα Hub-to-Hub Routing.....	73
4.4.4 Συνολικά αποτελέσματα δικτύου	74
4.5 Εφαρμογή-Αποτελέσματα για περίπτωση τεσσάρων (4) Hub	75
4.5.1 Αποτελέσματα Hub Location-Allocation για πλήθος Hub=4	75
4.5.2 Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου.....	75
4.5.3 Αποτελέσματα Hub-to-Hub Routing.....	84
4.5.4 Συνολικά αποτελέσματα δικτύου	84
4.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων	85
4.7 Ανάλυση ευαισθησίας.....	86
4.7.1 Ταχύτητα κίνησης.....	86
4.7.2 Χωρητικότητα πλοίου.....	87
4.7.3 Ζήτηση.....	88
4.8 Συμπεράσματα.....	89
4.8.1 Γενετικός αλγόριθμος.....	89
4.8.2 Ανάλυση ευαισθησίας	89
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	90
5.1 Σύνοψη μελέτης και αποτελεσμάτων	90
5.2 Συμπεράσματα.....	91
5.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	91
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	93
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	96

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1: Λιμάνια περιοχής μελέτης.....	44
Πίνακας 4.2: Αποστάσεις μεταξύ λιμανιών(Ναυτικά Μίλια).....	47
Πίνακας 4.3: Αποβιβασθέντες περιόδου Οκτώβριος 2016-Σεπτέμβριος 2017	48
Πίνακας 4.4: Ζήτηση από/προς Λαύριο.....	49
Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα Hub Location-Allocation (p=2).....	50
Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου – Hub Ίος	51
Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου – Hub Κάλυμνος	55
Πίνακας 4.8: Διαδρομές Hub to Spokes για δύο Hub.....	59
Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα Hub Location-Allocation (p=3).....	61
Πίνακας 4.10: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου – Hub Τήνος.....	62
Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου – Hub Κάλυμνος	65
Πίνακας 4.12: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου – Hub Σέριφος.....	69
Πίνακας 4.13: Διαδρομές Hub to Spokes για τρία Hub.....	73
Πίνακας 4.14: Αποτελέσματα Hub Location-Allocation (p=4).....	75
Πίνακας 4.15: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου – Hub Τήνος.....	76
Πίνακας 4.16: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου – Hub Κως	79
Πίνακας 4.17: : Διαδρομές Hub to Spokes για τέσσερα Hub	83
Πίνακας 4.18: Σύγκριση αποτελεσμάτων	86

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Διασταύρωση ενός σημείου	37
Εικόνα 3.2: Διασταύρωση δύο σημείων	37
Εικόνα 3.3: Τυχαία μετάλλαξη	37
Εικόνα 3.4: Διάγραμμα ροής τυπικού Γενετικού Αλγορίθμου	38

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 2.1: Κατανομή επιβατικής κίνησης στις χώρες τις ΕΕ	14
Διάγραμμα 2.2: Επιβατική κίνηση ανά περιοχή	14
Διάγραμμα 2.3: Hub&Spoke μοντέλο	15
Διάγραμμα 4.1: Μεταβολή της συνάρτησης ικανότητας σε σχέση με την ταχύτητα κίνησης.....	86
Διάγραμμα 4.2: Μεταβολή της συνάρτησης ικανότητας σε σχέση με τη χωρητικότητα	87
Διάγραμμα 4.3: Μεταβολή του αριθμού των διαδρομών σε σχέση με τη χωρητικότητα	87
Διάγραμμα 4.4: Μεταβολή της συνάρτησης ικανότητας σε σχέση με τη ζήτηση.....	88
Διάγραμμα 4.5: Μεταβολή του αριθμού των διαδρομών σε σχέση με τη ζήτηση	88

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΧΑΡΤΩΝ

Χάρτης 4.1: Περιοχή Μελέτης.....	45
Χάρτης 4.2: Δρομολόγηση πλοίων – Περίπτωση δύο Hub	60
Χάρτης 4.3: Δρομολόγηση πλοίων – Περίπτωση τριών Hub.....	74
Χάρτης 4.4: Δρομολόγηση πλοίων – Περίπτωση τεσσάρων Hub.....	85

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο εισαγωγικό κεφάλαιο πραγματοποιείται μια γενικότερη τοποθέτηση του προβλήματος που σχετίζεται με τη σχεδίαση ενός ακτοπλοϊκού δικτύου στο πλαίσιο Hub & Spoke συστήματος. Συγκεκριμένα, καταγράφεται η μέθοδος σχεδίασης του μέσω μεθόδων βελτιστοποίησης, παρουσιάζεται ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και η δομή της.

1.1 Γενική τοποθέτηση του προβλήματος

Οι θαλάσσιες μεταφορές αποτελούν διεθνώς, και ιδίως στην Ελλάδα, ένα πολύ σημαντικό κομμάτι του διεθνούς εμπορίου και των ανθρώπινων μετακινήσεων, με κύριους πρωταγωνιστές τον στόλο και τους λιμένες. Ως γνωστόν, η ακτογραμμή της Ελλάδας καλύπτει περίπου το 92% της περιφέρειάς της που περιλαμβάνει ένα ιδιαίτερα ανεπτυγμένο δίκτυο λιμένων, λόγω της ιδιομορφίας της Ελλάδας αλλά και λόγω της ύπαρξης πολλών νησιών. Η Ελληνική ακτοπλοΐα αποτελεί έναν ιδιαίτερα σημαντικό κλάδο καθώς, η Ελλάδα διαθέτει περίπου 200 κατοικημένα νησιά, ενώ διαθέτει περίπου 138 λιμάνια που βρίσκονται στα νησιά αλλά και στην ηπειρωτική χώρα. Επομένως, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι θαλάσσιες μεταφορές διαδραματίζουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο στη χώρα μας στον τομέα των μεταφορών και για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός αποτελεσματικού ακτοπλοϊκού δικτύου, οργανωμένο με τρόπο που να το καθιστά ικανό να ανταποκριθεί στις αυξημένες ανάγκες του τομέα.

Στις μέρες μας, έχει σημειωθεί η ανάπτυξη αρκετών συστημάτων που αποβλέπουν στη βελτίωση της λειτουργίας και της αποδοτικότητας των συνδυασμένων μεταφορών με διαφορετικούς τρόπους. Ένα εκ των συστημάτων αυτών, είναι το σύστημα “Hub & Spoke”. Το εν λόγω σύστημα χρησιμοποιείται όταν υπάρχουν πολλές τοποθεσίες γύρω από ένα κεντρικό σημείο στις οποίες πρέπει να διακινηθεί το φορτίο. Κατ’ αυτό τον τρόπο το κεντρικό λιμάνι ονομάζεται “Hub” και γύρω από αυτό υπάρχουν άλλα συνήθως μικρότερα λιμάνια τα οποία ονομάζονται “Spokes”. Επισημαίνεται ότι το βασικότερο πλεονέκτημα του συστήματος αυτού είναι πως χρειάζονται λιγότερα δρομολόγια για να εξυπηρετήσουν το δίκτυο με αποτέλεσμα ο προγραμματισμός τους να γίνεται πιο εύκολος και επιτυγχάνεται μια πιο αποτελεσματική διαμεταφορά. Στο πλαίσιο αυτό, η λειτουργία ενός συστήματος “Hub&Spoke” στον Ελλαδικό χώρο για τη μεταφορά επιβατών είναι ένα αρκετά σημαντικό αντικείμενο προς μελέτη και έρευνα. Με τη χρήση νέων τεχνολογιών και μεθόδων που εντάσσονται στην επιστήμη της Επιχειρησιακής Έρευνας δίνεται η δυνατότητα μελέτης του εν λόγω προβλήματος.

1.2 Σκοπός μελέτης

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας βάσει και των παραπάνω προβληματισμών είναι η ανάπτυξη ενός προτύπου για το βέλτιστο σχεδιασμό ενός ακτοπλοϊκού δικτύου, στο πλαίσιο ενός “Hub&Spoke” συστήματος. Πιο

συγκεκριμένα, αντικείμενο της μελέτης θα αποτελέσει τόσο η μεθοδολογία επιλογής των απαραίτητων κεντρικών λιμανιών (Hub) και η σύνδεση τους με άλλα νησιά (Spoke) όσο και η δρομολόγηση του απαραίτητου στόλου πλοίων, λαμβάνοντας υπ' όψιν την απόσταση μεταξύ των νησιών, καθώς και την αντίστοιχη ζήτηση. Κατ' αυτόν τον τρόπο, στη διαδικασία δόμησης του προτύπου υπεισέρχονται παράμετροι σχεδιασμού και λειτουργίας, η συνεκτίμηση των οποίων έχει ως απώτερο σκοπό τη δημιουργία ακτοπλοϊκών δικτύων που θα εξυπηρετούν τόσο τη ζήτηση ως προς τα εκάστοτε λιμάνια αλλά παράλληλα θα μειώνεται όσο τον δυνατόν και η διανυθείσα απόσταση.

Τα παραπάνω προβλήματα υπάγονται στο αντικείμενο με το οποίο ασχολείται η επιστήμη της Επιχειρησιακής Έρευνας. Αξίζει να σημειωθεί πως η Επιχειρησιακή Έρευνα είναι ένα πολύτιμο εργαλείο που συμβάλλει σημαντικά στη λήψη αποφάσεων αλλά και γενικότερα στην άσκηση διοίκησης, χρησιμοποιώντας σε μεγάλο βαθμό τις νέες τεχνολογίες και ειδικότερα τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές (Κολέτσος & Στόγιαννης, 2017). Επιπρόσθετα θα πρέπει να τονιστεί πως το παραπάνω προβλήματα δρομολόγησης ανήκει στην κατηγορία προβλημάτων NP-Hard ακέραιου, μη γραμμικού προγραμματισμού, δηλαδή κάποιων από τα πολυπλοκότερα προβλήματα βελτιστοποίησης, με πολλές άγνωστες μεταβλητές και περιορισμούς. Για αυτό το λόγο προτείνεται η επίλυση του με χρήση μετά-ευρετικής μεθόδου, όπως είναι για παράδειγμα, οι γενετικοί αλγόριθμοι. Συγκεκριμένα, οι Γενετικοί Αλγόριθμοι αποτελούν ένα σύστημα επίλυσης προβλημάτων αναζήτησης και βελτιστοποίησης, βασισμένο στις αρχές της Φυσικής Εξέλιξης. Οι αλγόριθμοι αυτοί ανήκουν στην κατηγορία των εξελικτικών αλγορίθμων, που με τη σειρά τους ανήκουν στους Μεταευρετικούς αλγορίθμους. Πλέον είναι ευρέως διαδεδομένοι κυρίως λόγω του στοχαστικού χαρακτήρα που ακολουθούν κατά την επαναληπτική διαδικασία που πραγματοποιούν για την εύρεση της βέλτιστης λύσης στο εκάστοτε πρόβλημα. Με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου, εισάγοντας τις απαιτούμενες παραμέτρους όπως είναι για παράδειγμα οι αποστάσεις και η ζήτηση των νησιών, γίνεται να επιλυθεί το εν λόγω πρόβλημα με το βέλτιστο τρόπο.

Τα αποτελέσματα των μεθοδολογιών παρέχουν τη δυνατότητα αξιολόγησης ενός ακτοπλοϊκού δικτύου Hub&Spoke μεταφοράς επιβατών, ενώ παράλληλα συμβάλλουν στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων ως προς την εκπόνηση μελλοντικών δράσεων αντιμετώπισης του προβλήματος άρα και βελτίωσης των θαλάσσιων μεταφορών. Συνεπώς, η παρούσα εργασία καλείται να απαντήσει αρχικά, κατά πόσο είναι αποτελεσματική η συγκεκριμένη μεθοδολογία για το σχεδιασμό ενός Hub&Spoke δικτύου στην ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου Πελάγους. Τέλος, μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων που προέκυψαν ανά αριθμό Hub, σκοπείται να διαπιστωθεί η σημασία της Επιχειρησιακής Έρευνας και η σημασία του ρόλου που μπορούν να διαδραματίσουν στην αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, άρα και στο σχεδιασμό νέων μεθόδων λειτουργίας των θαλάσσιων μεταφορών και κατ' επέκταση στην περαιτέρω ανάπτυξη του ακτοπλοϊκού δικτύου της χώρας.

1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η εν λόγω διπλωματική εργασία διαρθρώνεται σε έξι επιμέρους κεφάλαια, εντός των οποίων περιγράφονται οι θεωρητικές έννοιες που είναι απαραίτητες για την κατανόηση του προβλήματος, οι διαδικασίες που ακολουθούνται τόσο για τη δημιουργία του αλγορίθμου όσο και για την εφαρμογή του στο σχεδιασμό ενός ακτοπλοϊκού δικτύου στην περιοχή του Αιγαίου και τέλος, η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν τόσο για την περιοχή μελέτης αλλά και συνολικά.

Κεφάλαιο 2^ο

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται σημαντικά στοιχεία για τις θαλάσσιες μεταφορές καθώς και η έννοια του σχεδιασμού δικτύων και μεταφορών. Συγκεκριμένα, παρατίθεται η θεωρητική προσέγγιση του συστήματος Hub&Spoke αλλά και πως αυτό συνδέεται με τις θαλάσσιες μεταφορές. Επίσης, παρουσιάζεται το πρόβλημα Hub Location-Allocation και εκτενής ανασκόπηση της υφιστάμενης βιβλιογραφίας που το αφορά. Επιπλέον περιγράφεται το Vehicle Routing Problem που αφορά τη δρομολόγηση των πλοίων από τα Hubs προς τα Spokes καθώς και η αντίστοιχη βιβλιογραφική ανασκόπηση.

Κεφάλαιο 3^ο

Στο εν λόγω κεφάλαιο αναλύεται το μεθοδολογικό πλαίσιο το οποίο επιλέχθηκε για την επίλυση του προβλήματος. Αρχικά, πραγματοποιείται η περιγραφή του μαθηματικού προτύπου, δηλαδή της αντικειμενικής συνάρτησης που αποτελεί την προς βέλτιστη επίλυση συνάρτηση καθώς και των περιορισμών που τη συνοδεύουν. Ακόμη γίνεται μια σύντομη αναφορά στη γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic, με την οποία συγγράφηκε ο κώδικας. Τέλος αναλύεται και παρουσιάζεται ο ρόλος των γενετικών αλγορίθμων – οι οποίοι αποτελούν τον τρόπο με τον οποίο επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί η βελτιστοποίηση της δρομολόγησης- στη μελέτη του προβλήματος καθώς και στην αποτελεσματική αντιμετώπιση του. Τέλος περιγράφεται ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για την επίλυση του προβλήματος.

Κεφάλαιο 4^ο

Παρουσιάζονται αναλυτικά η διαδικασία εφαρμογής του γενετικού αλγορίθμου καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του στο πρόβλημα. Επιπρόσθετα παρουσιάζεται η βέλτιστη τελικά λύση του προβλήματος και στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας για διάφορες παραμέτρους του μοντέλου.

Κεφάλαιο 5^ο

Παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της μελέτης και γίνονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα σχετικά με το πρόβλημα.

Στο κεφάλαιο της βιβλιογραφίας δίνεται η λίστα με όλες τις βιβλιογραφικές αναφορές που χρησίμευσαν ως πηγές για την εργασία.

Στο παράρτημα παρατίθεται ο κώδικας που αναπτύχθηκε για την εφαρμογή του γενετικού αλγόριθμου και την επίλυση του προβλήματος στη γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ

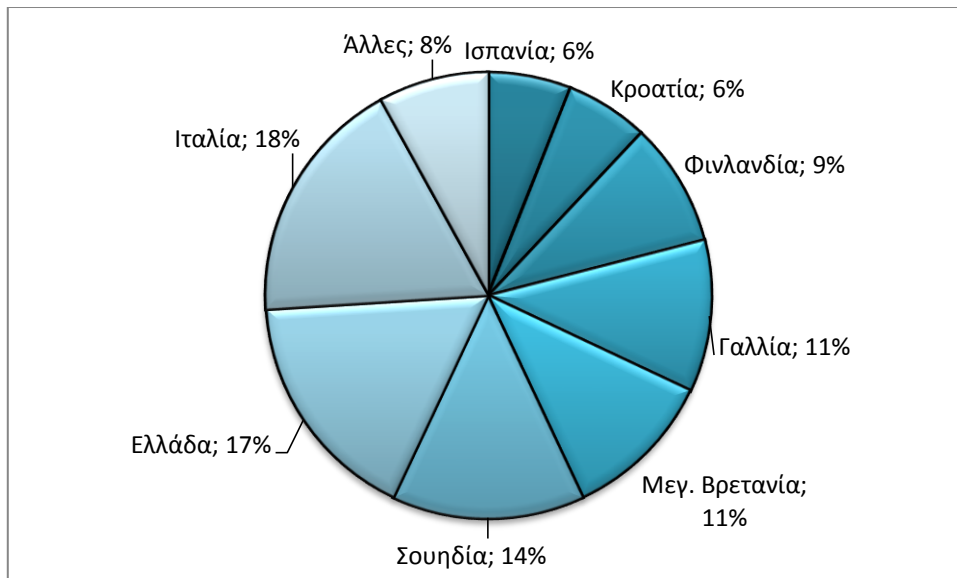
Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά παρουσιάζεται η έννοια και ο μείζων ρόλος που διαδραματίζουν οι θαλάσσιες μεταφορές στη σημερινή πραγματικότητα, ενώ παράλληλα γίνεται αναφορά στο ζήτημα σχεδιασμού αυτών. Στη συνέχεια παρουσιάζεται και αναλύεται το σύστημα μεταφορών Hub&Spoke, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως σε οποιοδήποτε σύστημα μεταφορών. Επιπλέον, γίνεται αναφορά σε βασικά μοντέλα χωροθέτησης Hub, που αποτελεί ένα από τα προβλήματα που καλούμαστε να επιλύσουμε στο πλαίσιο της εν λόγω εργασίας. Τέλος γίνεται εκτενής αναφορά σε μοντέλα επίλυσης του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων στο πλαίσιο της επιχειρησιακής έρευνας.

2.1 Ελληνική Ακτοπλοΐα

Οι θαλάσσιες μεταφορές αποτελούν διεθνώς, και ιδίως στην Ελλάδα, ένα πολύ σημαντικό κομμάτι του διεθνούς εμπορίου και των ανθρώπινων μετακινήσεων, με κύριους πρωταγωνιστές τον στόλο και τους λιμένες. Είναι γεγονός πως περισσότερο από το 90% του παγκόσμιου εμπορίου πραγματοποιείται μέσω θαλάσσης, καθώς το θαλάσσιο εμπόριο προσφέρει στους εμπόρους μία σειρά από πλεονεκτήματα, μεταφέροντας τα αγαθά με ασφάλεια και σε χαμηλό κόστος σε σχέση με τα άλλα μέσα μεταφοράς. Συγκεκριμένα, η Ευρωπαϊκή ναυτιλία εκτιμάται ότι συνεισφέρει στο ΑΕΠ της Ευρωπαϊκής Ένωσης κατά 56 δισεκατομμύρια ευρώ. Καθ' αυτό τον τρόπο, γίνεται εύκολα αντιληπτή η σημασία των θαλάσσιων μεταφορών στις μέρες μας και ειδικότερα για την Ελλάδα που κατέχει το μεγαλύτερο στόλο μεταξύ των χωρών της Ευρώπης, συμβάλλοντας άμεσα στην ελληνική οικονομία.

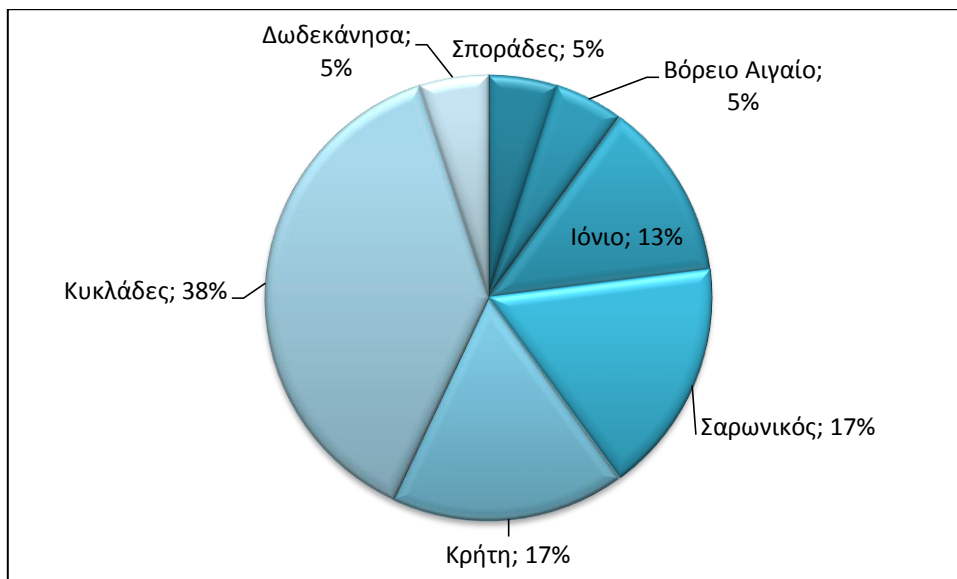
Η Ελληνική Ακτοπλοΐα ανήκει στον τομέα της ναυτιλίας τακτικών γραμμών και διακινεί εμπορεύματα, επιβάτες και οχήματα στα λιμάνια της ηπειρωτικής και νησιωτικής Ελλάδας μέσα από ένα πολύπλοκο σύστημα συνδέσεων. Ο νησιωτικός χαρακτήρας της χώρας υποδεικνύει επομένως την ανάγκη για επαρκείς και ποιοτικές θαλάσσιες συγκοινωνίες, δεδομένου ότι στην Ελλάδα υπάρχουν περισσότερα από 120 κατοικημένα νησιά με πληθυσμό που ξεπερνά τα 1,3 εκατ. άτομα. Ως εκ τούτου, ο ακτοπλοϊκός κλάδος επιτελεί σημαντικό έργο συνδέοντας την ηπειρωτική χώρα με τη νησιωτική Ελλάδα.

Η ελληνική ακτοπλοΐα αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες στην Ευρώπη. Η Ελλάδα μαζί με την Ιταλία είναι τα κράτη-μέλη με τη μεγαλύτερη επιβατική κίνηση, καθώς η κάθε μία καλύπτει περίπου το 17-18% (Eurostat) της συνολικής ακτοπλοϊκής διακίνησης επιβατών στην Ευρώπη, αν και στην Ελλάδα, λόγω της πληθώρας νησιών στη χώρα, οι ακτοπλοϊκές γραμμές είναι σαφώς περισσότερες σε σχέση με την Ιταλία. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η κατανομή της επιβατικής κίνησης μέσω θαλάσσης στις χώρες μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης.



Διάγραμμα 2.1: Κατανομή επιβατικής κίνησης στις χώρες τις ΕΕ
(Πηγή: Eurostat)

Αξίζει να σημειωθεί πως στον Ελλαδικό χώρο η μεγαλύτερη κίνηση επιβατών παρατηρείται στις ακτοπλοϊκές γραμμές Κυκλάδων και Κρήτης, όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 2.2: Επιβατική κίνηση ανά περιοχή
(Πηγή: Ελ.Στατ.)

Συνοψίζοντας, ο κλάδος της ακτοπλοΐας διαδραματίζει μείζονα ρόλο στην εγχώρια οικονομική δραστηριότητα, προσφέροντας υπηρεσίες μέσω ενός ανεπτυγμένου δικτύου διασύνδεσης της ηπειρωτικής με τη νησιωτική Ελλάδα. Με αυτόν τον τρόπο όπως αναφέρεται και στην έκθεση του Ιδρύματος Οικονομικών και Βιομηχανικών Ερευνών – ΙΟΒΕ(2014), «η επιβατηγός ακτοπλοΐα επιδρά στην οικονομία τόσο με τις υπηρεσίες που προσφέρει στη διακίνηση επιβατών και εμπορευμάτων, όσο και μέσω ενός ευρύτερου συστήματος δραστηριοτήτων που συνδέεται με τη ζήτηση για τις υπηρεσίες που προσφέρει ο κλάδος». Επομένως, γίνεται εύκολα κατανοητό πως ο

σχεδιασμός τόσο λειτουργικών όσο και αποδοτικών δικτύων θαλάσσιων μεταφορών είναι μείζονος σημασίας στις μέρες μας.

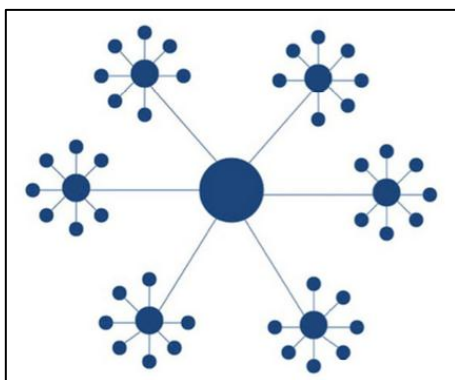
2.2 Σχεδιασμός δικτύου μεταφορών

Το πρόβλημα δικτύου αφορά στην περίπτωση «οποιοδήποτε 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). Τέτοιου τύπου προβλήματα βρίσκουν ποικίλες εφαρμογές στον χώρο των μεταφορών και των επικοινωνιών και γι' αυτό τον λόγο απασχολούν μεγάλο κομμάτι της διεθνούς βιβλιογραφίας.

Τα προβλήματα σχεδιασμού δικτύων μπορούν να έχουν πολλούς διαφορετικούς στόχους, όπως η μείωση του κόστους μεταφοράς αγαθών ή ατόμων, η αύξηση της ποσότητας αγαθών ή ατόμων που θα μεταφερθούν, η κατά το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση του χρόνου μετακίνησης και πολλοί άλλοι. Έτσι, τα προβλήματα αυτά υπάγονται στην κατηγορία προβλημάτων βελτιστοποίησης, όπου στόχος είναι η ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Τις περισσότερες φορές, μαζί με την αντικειμενική συνάρτηση τίθενται και κάποιοι περιορισμοί οι οποίοι πρέπει να ικανοποιούνται και αναφέρονται συνήθως στις ελάχιστες ή μέγιστες απαιτήσεις του συστήματος αλλά και στους περιορισμούς στους διαθέσιμους πόρους. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα προβλήματα δικτύων επιλύονται με τη χρήση προσεγγιστικών μεθόδων (heuristics). Αυτό συμβαίνει διότι, για κάθε δίκτυο που αποτελείται από n κόμβους, υπάρχουν $[n \cdot (n - 1)/2]$ δυνατές συνδέσεις, που ενώνουν τους κόμβους μεταξύ τους ανά δύο. Έτσι γίνεται φανερό πως στα προβλήματα αυτά, ειδικά όταν περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό κόμβων, ο εντοπισμός της βέλτιστης δυνατής λύσης αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία. Συνεπώς, θεωρείται πως οι προσεγγιστικές μέθοδοι μπορούν να αποδώσουν με τον καλύτερο τρόπο την πολυπλοκότητα αυτή και να οδηγήσουν στα βέλτιστα αποτελέσματα.

2.3 Σύστημα Hub & Spoke

Το μοντέλο Hub and Spoke (H&S) χρησιμοποιείται κυρίως όταν υπάρχουν πολλές τοποθεσίες γύρω από ένα κεντρικό σημείο στις οποίες πρέπει να διακινηθεί το φορτίο. Το κεντρικό λιμάνι ονομάζεται hub και γύρω από το κεντρικό λιμάνι υπάρχουν προεκτάσεις του λιμανιού, δηλαδή μικρότερα λιμάνια τα οποία ονομάζονται "Spokes". Το εν λόγω μοντέλο παρουσιάζεται σχηματικά παρακάτω.



Διάγραμμα 2.3: Hub&Spoke μοντέλο

Βασικά πλεονεκτήματα ενός συστήματος Hub&Spoke είναι τα εξής:

- Διασφαλίζει χαμηλότερο κόστος για τους πελάτες, αφού επιτυγχάνονται οικονομίες κλίμακας
- Χρειάζονται λιγότερα δρομολόγια για να εξυπηρετήσουν το δίκτυο με αποτέλεσμα ο προγραμματισμός τους να γίνεται πιο εύκολος και έτσι η διαμεταφορά να γίνεται πιο αποτελεσματική.
- Ο μικρός αριθμός δρομολογίων μπορεί επίσης να οδηγήσει σε αποτελεσματικότερη χρήση των μεταφορικών μέσων. Κάθε διαδρομή μπορεί να πραγματοποιηθεί πιο συχνά και με μεγαλύτερη χωρητικότητα, επειδή η ζήτηση για επιβάτες μπορεί να διατεθεί από περισσότερες από μία πόλεις.

Αντιθέτως μερικά μειονεκτήματα του εν λόγω συστήματος είναι τα παρακάτω:

- Σε περίπτωση καθυστέρησης της κεντρικής διαδρομής επηρεάζονται και οι διαδρομές από τα Hubs προς τα Spokes. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η ποιότητα των υπηρεσιών και ταυτόχρονα η εταιρία να παρουσιάζει ζημία.
- Επειδή απαιτούνται τουλάχιστον δύο ταξίδια για να φθάσουν σε προορισμούς διαφορετικούς από τον κόμβο, η διανυόμενη απόσταση μπορεί να είναι μεγαλύτερη από μια απ' ευθείας διαδρομή μεταξύ σημείων αναχώρησης και προορισμού.
- Ο χρόνος που περνάει στο κέντρο αυξάνει τη διάρκεια του ταξιδιού.

Αξίζει να σημειωθεί πως αρκετές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί για τη χρήση του εν λόγω συστήματος, κυρίως στη μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων, όπως για παράδειγμα στον ποταμό Yangtze της Κίνας (Zheng, 2016). Οι μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί παρουσιάζουν ποικιλία ως προς τη μεθοδολογία επίλυσης, τους στόχους που καλούνται να πραγματοποιήσουν μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης, τους περιορισμούς που τίθενται αλλά και την εφαρμογή τους σε πραγματικές περιπτώσεις. Σημαντική έρευνα πραγματοποιήθηκε επίσης από τον Zheng(2015), όπου προτείνει ένα πρόβλημα σχεδιασμού δικτύων μεταφοράς στο πλαίσιο Hub&Spoke συστήματος εισάγοντας συγκεκριμένους περιορισμούς μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων όπως πολλαπλών τύπων εμπορευματοκιβωτίων αλλά και χρόνου μεταφοράς, οι οποίοι σπάνια λαμβάνονται υπόψη σε προηγούμενες μελέτες. Επιπλέον ο Yu An(2015) προτείνει να λαμβάνονται υπόψη εφεδρικοί κόμβοι-hubs και εναλλακτικές διαδρομές για την προαιρετική αντιμετώπιση πιθανών προβλημάτων.

Σε μια άλλη έρευνα, μελετάται η βελτίωση της απόδοσης φορτηγίδων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων στη περιοχή του λιμανιού του Ρότερνταμ μέσω της ανάπτυξης ενός δικτύου Hub&Spoke (Rob Konings, 2013). Τα αποτελέσματα έδειξαν πως το hub-and-spoke έχει τη δυνατότητα να προσφέρει καλύτερη απόδοση υπό την προϋπόθεση ότι τα κόστη διεκπεραίωσης στον κόμβο-hub μπορούν να παραμείνουν εντός ορίων.

Πέρα από την αγορά των Container, μελέτη σκοπιμότητας έχει πραγματοποιηθεί για αλυσίδες ανεφοδιασμού LNG μέσω συστήματος Hub&Spoke στην Βορειοδυτική Ευρώπη(Festen-Purohit, 2009). Στην εν λόγω μελέτη παρατηρήθηκε πως είναι ρεαλιστική μια τέτοια προσέγγιση από τη στιγμή που δημιουργούνται οικονομίες κλίμακας μεταξύ των Hubs.

Είναι φανερό πως η διεθνής βιβλιογραφία περιορίζεται κυρίως στην αγορά των Containers και όχι στη μεταφορά επιβατών. Το φαινόμενο αυτό είναι αναμενόμενο καθώς σε λίγες χώρες πέρα από την Ελλάδα παρατηρείται έντονη πυκνότητα μικρών νησιών.

2.3.1 Σύστημα Hub & Spoke στην Ελληνική Ακτοπλοΐα

Είναι γεγονός πως συστήματα Hub&Spoke είναι ευρέως διαδεδομένα και χρησιμοποιούνται σε μεταφορές επιβατών μέσω τρένων και αεροπλάνων αλλά και στη μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητάς τους απαιτείται ιδιαίτερη έρευνα και μελέτη για τη χρήση τους στη θαλάσσια μεταφορά επιβατών. Τα τελευταία χρόνια, όλο και περισσότερο μελετάται πως επηρεάζεται και ποιες είναι οι νέες δυνατότητες που παρατηρούνται στη ελληνική ναυτιλία με τη συνεχώς αυξανόμενη χρήση νέων τεχνολογιών και μεθόδων (Ψαραύτης, 2007). Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί πως η ανάλυση και η κριτική προσαρμογή επιχειρηματικών διαδικασιών στη σύγχρονη ναυτιλία μπορεί να προσκομίσει πολύ μεγάλα οφέλη στις αντίστοιχες εταιρίες (Λυρίδης, 2005).

Βάσει των παραπάνω γίνεται σαφές πως με τη χρήση νέων τεχνολογιών και μεθόδων μπορεί να διερευνηθεί κατά πόσο είναι εφικτό και αποδοτικό ένα σύστημα Hub&Spoke για την εξυπηρέτηση επιβατών στην Ελλάδα. Ένα τέτοιο σύστημα δεν πρέπει να θεωρείται ως εναλλακτική λύση στις τρέχουσες πρακτικές μεταφοράς επιβατών αλλά ως συμπληρωματική υπηρεσία που προσφέρεται στους επιβάτες (Schinas, 2009). Αυτό μπορεί να συμβεί είτε τους καλοκαιρινούς μήνες που υπάρχει αυξημένη ζήτηση είτε για τακτική σύνδεση μεταξύ της ηπειρωτικής χώρας και ομάδας νησιών, ιδιαίτερα το χειμώνα που δεν είναι οικονομικά συμφέρον να μετακινούν οι εταιρίες μεγάλα πλοία για μικρούς όγκους κυκλοφορίας. Σε μερικές περιπτώσεις, το μοντέλο Hub&Spoke μπορεί να θεωρηθεί ως εναλλακτική λύση των αεροπορικών μεταφορών εάν και εφόσον η διαδρομή είναι ταχύτερη. Επιπρόσθετα η υπηρεσία αυτή είναι πλήρως επικεντρωμένη στη μεταφορά επιβατών και όχι οχημάτων. Ακόμη ειδική μέριμνα θα πρέπει να πραγματοποιηθεί για τη μεταφορά των αποσκευών από το ένα πλοίο στο άλλο.

Ως εκ τούτου, γίνεται κατανοητό πως η ανάπτυξη ενός προτύπου για το βέλτιστο σχεδιασμό ενός ακτοπλοϊκού δικτύου, στο πλαίσιο ενός “Hub&Spoke” συστήματος είναι πολύ σημαντική.

2.4 Hub Location-Allocation

Ένα θέμα της επιχειρησιακής ερευνάς, το οποίο τα τελευταία χρόνια μελετάται όλο και περισσότερο, είναι αυτό της ανάλυσης της χωροθέτησης εγκαταστάσεων για την ανάπτυξη και βελτιστοποίηση νέων δικτύων. Στην ενότητα αυτή αναλύεται το πρόβλημα της χωροθέτησης διατυπώνοντας μοντέλα, όπου η επίλυση τους οδηγεί στην αντιμετώπιση του προβλήματος και γενικότερα στην ανάπτυξη και στη βελτιστοποίηση των υπό σχεδιασμό δικτύων.

Το πρόβλημα χωροθέτησης πλημνών και σχεδιασμού δικτύων (hub location problem and network design) η απλούστερα πρόβλημα χωροθέτησης πλημνών (hub location problem) όπως παρουσιάστηκε από τον O'Kelly (1986) είναι ένα σύνθετο μείγμα της ανάλυσης χωροθέτησης και της χωρικής θεωρίας αλληλεπίδρασης. Στη γενικότερη του μορφή αυτό το πρόβλημα περιλαμβάνει τα παρακάτω:

1. εύρεση των κατάλληλων θέσεων για τις εγκαταστάσεις και τις πλήμνες
2. κατανομή των απλών κόμβων, δηλαδή κόμβοι που δεν είναι πλήμνες, σε κόμβους πλήμνες
3. η ανάπτυξη συνδέσεων μεταξύ των πλημνών και
4. η δρομολόγηση των ροών διάμεσου του δικτυού.

Ένα δίκτυο με πλήμνες αποτελείται από τρία κύρια στοιχεία: τους απλούς κόμβους εξυπηρέτησης, τις πλήμνες και τις συνδέσεις. Όλη η κίνηση που εισάγεται σε μια πλήμνη θα πρέπει και να εξέλθει. Οι συνδέσεις ή τόξα που συνδέουν τους απλούς κόμβους με τις πλήμνες θα πρέπει να έχουν τις ακόλουθες ιδιότητες: 1) κάθε απλός κόμβος θα πρέπει να συνδέεται τουλάχιστον με μια πλήμνη και 2) μια έγκυρη διαδρομή θα πρέπει να υφίσταται ανάμεσα σε όλες τις πλήμνες. Αυτές οι δυο ιδιότητες διασφαλίζουν ότι υπάρχει μια εφικτή διαδρομή ανάμεσα σε όλες τις πηγές και τους προορισμούς στο δίκτυο (Ρόθος&Λυρίδης, 2014).

Για να γίνει πιο κατανοητό, το Hub Location Problem μπορεί να διαχωριστεί στις επιμέρους ιδιότητες που το χαρακτηρίζουν (Farahani, 2013):

- Πεδίο ορισμού λύσης: α) Δίκτυο → τα υποψήφια hubs είναι όλοι οι κόμβοι του δικτύου, β) Διακριτό → τα υποψήφια hubs είναι συγκεκριμένοι κόμβοι, γ) Συνεχές → τα υποψήφια hubs βρίσκονται σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο
- Κριτήριο βελτιστοποίησης: α) Mini-Max, όπου το μέγιστο κόστος μεταφοράς ελαχιστοποιείται, β) Mini-Sum, όπου το συνολικό κόστος μεταφοράς ελαχιστοποιείται
- Τρόπος προσδιορισμού πλήθους Hubs προς λύση: α) Εξωγενώς (από το χρήστη), β) Ως μέρος του προβλήματος
- Αριθμός Hub: α) Ένα, β) Άνω του ενός
- Κόστος εγκατάστασης Hub: α) Χωρίς κόστος, β) Σταθερό κόστος, γ) Μεταβλητό κόστος
- Χωρητικότητα Hub: α) Απεριόριστη, β) Με όριο
- Σύνδεση μη-hub στα hub: α) Ένα προς ένα. β) ένα μη-hub σε πολλά hub

- Κόστος σύνδεσης μη-hub σε hub: α) Μηδενικό κόστος, β) Σταθερό κόστος, γ) Μεταβλητό κόστος

Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποιες μαθηματικές διατυπώσεις βασικών προβλημάτων χωροθέτησης Hub.

2.4.1 Single Hub Location Problem (O' Kelly 1987)

Ο O'Kelly(1987) εισήγαγε αυτό το πρόβλημα όπου υπάρχει μόνο ένα Hub. Στο μοντέλο εισάγονται τα εξής:

h_{ij} : η ροή από την προέλευση i στον προορισμό j

C_{ij} : κόστος μετακίνησης από το κόμβο i στον j

Και εξάγονται τα εξής αποτελέσματα:

$X_j=0$ κόμβος j είναι hub

Y_{ij} =ένας κόμβος i είναι συνδεδεμένος στο hub j

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η εξής:

$$\text{Min} \sum_i \sum_j \sum_k h_{ik} (C_{ij} + C_{jk}) y_{ij} y_{kj}$$

Με τους εξής περιορισμούς

$$\sum_j X_j = 1,$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i,j,$$

$$X_j = 0, 1 \quad \forall j,$$

$$Y_{ij} = 0, 1 \quad \forall i,j.$$

Όπου ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος μεταφοράς διαμέσου του hub, διασφαλίζεται ότι βρίσκεται μόνο ένα hub και ότι διασφαλίζεται ότι ο κόμβος i μπορεί να συνδεθεί μόνο σε κόμβο που είναι hub. Οι δύο τελευταίοι προορισμοί είναι κλασικοί περιορισμοί δήλωσης ακέραιων δυαδικών μεταβλητών.

2.4.2 P-Hub Location Problem (O' Kelly 1987)

Πρόκειται για μοντέλο που το πλήθος των Hub είναι μεγαλύτερο του ενός και η σύνδεση των μη-hub στα hub είναι ένας προς ένα. Σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο δίνεται εξωγενώς ένας παράγοντας έκπτωσης α , λόγω οικονομικών κλίμακας. Επίσης καθορίζεται το πλήθος hub(P) από τον χρήστη.

Η αντικειμενική συνάρτηση έχει ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_i \sum_k C_{ik} Y_{ik} \left(\sum_j h_{ij} \right) + \sum_k \sum_i C_{ki} Y_{ik} \left(\sum_J h_{ji} \right) \\ & + \alpha \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m h_{ij} C_{km} y_{ik} y_{jm}. \end{aligned}$$

Με τους εξής περιορισμούς

$$\sum_j y_{ij} = 1 \quad \forall i,$$

$$\sum_j x_j = P,$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall i, j,$$

$$x_j = 0, 1 \quad \forall j,$$

$$y_{ij} = 0, 1 \quad \forall i, j.$$

2.4.3 P-Hub Center Location Problem (Campbell 1994)

Σε αντίθεση με τα παραπάνω προβλήματα που είναι ελαχιστοποίησης, η αντικειμενική συνάρτηση αυτού του προβλήματος είναι της μορφής μεγιστοποίησης. Εφαρμόζεται σε πολύ σημαντικά δίκτυα όπως η χωροθέτηση εγκαταστάσεων και οχημάτων άμεσους ανάγκης. Αυτού του είδους τα προβλήματα είναι σημαντικά καθώς σχετίζονται με αναλώσιμα και ευαίσθητα αγαθά όπου ο χρόνος είναι ο κυριότερος παράγοντας και το κόστος συνδέεται άμεσα με το χρόνο. Με Z_{ij}^{km} η ροή από το κόμβο i στον προορισμό j χρησιμοποιώντας τα πιθανά hub k και m .

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η εξής:

$$\text{Min Max } \{C_{ij}^{km} h_{ij} Z_{ij}^{km}\}.$$

Με τους εξής περιορισμούς:

$$\sum_k X_k = P,$$

$$\sum_k \sum_m Z_{ij}^{km} = 1 \forall i, j,$$

$$Z_{ij}^{km} \leq X_k \forall i, j, k, m,$$

$$Z_{ij}^{km} \leq X \forall i, j, k, m,$$

$$0 \leq X_k \leq 1 \forall k,$$

$$0 \leq Z_{ij}^{km} \leq 1 \forall i, j, k, m.$$

Όπου ελαχιστοποιείται το μέγιστο κόστος μετακίνησης μεταξύ προορισμού και προέλευση.

Αξίζει να σημειωθεί πως κατά καιρούς έχουν διατυπωθεί πολλά μαθηματικά μοντέλα για την επίλυση του προβλήματος της χωροθέτησης Hub. Επομένως είναι σαφές πως ανάλογα το πρόβλημα που πρόκειται να επιλυθεί, επιλέγεται και το κατάλληλο μοντέλο. Στον παρακάτω πίνακα γίνεται μια αναφορά των κυριότερων μελετών που έχουν γίνει πάνω στο πρόβλημα αυτό.

2.5 Προβλήματα δικτύου μεταφορών - Vehicle Routing Problem

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.

Γενικά ένα δίκτυο μεταφοράς ορίζεται ως ένα πεπερασμένο σύνολο κόμβων V , που χωρίς βλάβη της γενικότητας μπορεί να ταυτιστεί με το σύνολο $\{1, \dots, N\}$ 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).

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).

Αρκετές εφαρμογές έχουν παρατηρηθεί και για τον ελλαδικό χώρο όπως για παράδειγμα για το σχεδιασμό δικτύου υδροπλάνων στο Αιγαίο (Πιορουλou, 2015), για το σχεδιασμό δικτύου πλοίων εμπορευματοκιβωτίων με ταυτόχρονες παραδόσεις & παραλαβές καθώς και χρονικούς περιορισμούς (Κεραρτσoglou, 2009), για την ασφαλή παροχή ενέργειας σε νησιά του Αιγαίου λαμβάνοντας υπόψη και περιβαλλοντικές παραμέτρους (Πιορουλou, 2018) ακόμη και για σχεδιασμό δικτύου λεωφορειακών γραμμών λαμβάνοντας υπόψη και τους ανικανοποίητους επιβάτες (Charisis, 2016).

Ωστόσο αξίζει να σημειωθεί πως η δημοσιευμένη βιβλιογραφία για το σχεδιασμό δικτύου επιβατηγών πλοίων στο πλαίσιο Hub&Spoke συστήματος είναι ελάχιστη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζεται το μεθοδολογικό πλαίσιο για την επίλυση του προβλήματος που τέθηκε προηγουμένως. Δηλαδή το βέλτιστο σχεδιασμό ενός ακτοπλοϊκού δικτύου στο πλαίσιο ενός Hub&Spoke συστήματος. Όπως παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, το εν λόγω σύστημα είναι αρκετά σύνθετο και για αυτό το λόγο αναλύεται και επιλύεται σε υπο-προβλήματα, η σύνθεση των οποίων παρέχει την τελική βέλτιστη λύση που αναζητείται. Αξίζει να αναφερθεί πως στο πλαίσιο της εν λόγω εργασίας το δίκτυο που μελετάται απευθύνεται αποκλειστικά στη μεταφορά επιβατών, βάση και της θεωρητικής προσέγγισης που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο της εργασίας «Exploring the possibility for hub-and-spoke services in the Greek Coastal System» (Schinas O., 2009).

Στο πλαίσιο αυτού του κεφαλαίου πιο συγκεκριμένα, αναλύονται τα μαθηματικά πρότυπα που χρειάζονται για την επίλυση των επιμέρους προβλημάτων, καθώς και οι αντίστοιχες αντικειμενικές συναρτήσεις που τα εκφράζουν, όπως και οι επιβαλλόμενοι περιορισμοί που απαιτούνται. Ακόμη, θα περιγραφούν τα μεθοδολογικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του προβλήματος με κυρίως με μια εκτενή αναφορά στους γενετικούς αλγόριθμους, που αποτελούν το μοντέλο με το οποίο πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση στο πρόβλημα της δρομολόγησης των διαδρομών από τα Hubs προς τα Spokes. Τέλος, περιγράφεται συγκεκριμένα ο γενετικός αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος.

3.1 Μαθηματικό πρότυπο

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος, αποφασίστηκε βάση και της διεθνούς βιβλιογραφίας, το εν λόγω πρόβλημα να αναλυθεί και να επιλυθεί σε τρία επιμέρους στάδια που έχουν ως εξής:

- **Hub Location-Allocation Problem**
Εύρεση των κόμβων που θα αποτελέσουν τα Hubs στο δίκτυο και κατανομή των υπόλοιπων λιμανιών-Spokes στα αντίστοιχα Hubs.
- **Vehicle Routing Problem – Hub to Spokes**
Εύρεση των βέλτιστων διαδρομών για κάθε Hub προς τα αντίστοιχα Spokes.
- **Vehicle Routing Problem - Hub to Hub**
Εύρεση της βέλτιστης διαδρομής από την αφετηρία προς τα Hubs.

3.1.1 Hub Location-Allocation Problem

Στο πρώτο από τα τρία στάδια που αποτελούν το μεθοδολογικό πλαίσιο της παρούσας εργασίας, επιλύεται το πρόβλημα χωροθέτησης των κόμβων που θα αποτελέσουν τα Hubs στο δίκτυο. Για την επίλυση του εν λόγω προβλήματος παρατίθενται οι απαιτούμενες παραδοχές που πρέπει να γίνουν, η αντικειμενική συνάρτηση η οποία θα μετράει το συνολικό κόστος του δικτύου και θα αποτελέσει την προς βελτιστοποίηση μεταβλητή και στους επιπρόσθετους περιορισμούς που θα επιβληθούν σε αυτή.

Βασικές παραδοχές

Οι βασικές παραδοχές είναι οι εξής:

- Η αντικειμενική συνάρτηση είναι τύπου Mini-Sum.
- Κάθε κόμβος που δεν είναι Hub, -άρα είναι Spoke- συνδέεται με ακριβώς ένα (1) Hub. – Single Allocation
- Το πλήθος των Hub είναι γνωστό και προσδιορισμένο «εξωγενώς», δηλαδή από τον χρήστη. - Exogenous
- Το κόστος εγκατάστασης των Hubs δε λαμβάνεται υπ' όψιν. – No cost.
- Η χωρητικότητα των Hub κόμβων είναι απεριόριστη – Uncapacitated Model.
- Όλες οι μεταβλητές απόφασης του μοντέλου είναι δυαδικές μεταβλητές 0-1.

Inputs

P =το πλήθος των hub που καλείται να βρει το μοντέλο και

C_{ij} =η απόσταση μεταξύ του κόμβου i και του κόμβου j

Outputs

X_j = στον κόμβο j αντιστοιχεί ένα hub

Y_{ij} = ο κόμβος i είναι συνδεδεμένος με το hub που αντιστοιχεί στον κόμβο j

Αντικειμενική Συνάρτηση

Για τη μαθηματική προτυποποίηση του προβλήματος είναι αναγκαίο να ορίσουμε ένα σύνολο κόμβων C , που αντιπροσωπεύουν τους κόμβους του δικτύου, και ένα σύνολο ακμών E . Η κάθε ακμή ορίζεται μονοσήμαντα από ένα διατεταγμένο ζεύγος (i, j) όπου $i \neq j$. Για κάθε ακμή I, j αντιστοιχεί ένα συγκεκριμένο κόστος c_{ij} το οποίο αντιπροσωπεύει το κόστος της διαδρομής του πλοίου για την συγκεκριμένη ακμή.

Το πρόβλημα συνεπώς διατυπώνεται ως εξής:

$$\min \sum_i \sum_j C_{ij} Y_{ij} \quad (3.1.1)$$

$$\sum_j Y_{ij} = 1 \forall i \quad (3.1.2)$$

$$\sum_j x_j = P \quad (3.1.3)$$

$$Y_{ij} - x_j \leq 0 \forall i, j \quad (3.1.4)$$

$$x_j = 0, 1 \forall j \quad (3.1.5)$$

$$y_{ij} = 0, 1 \forall i, j \quad (3.1.6)$$

Η συνάρτηση (3.1.1) αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, στόχος της οποίας είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους για το δίκτυο, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις αποστάσεις των spokes από τα hubs.

Περιορισμοί

- Στην εξίσωση (3.1.2) εξασφαλίζεται ότι κάθε κόμβος i συνδέεται σε ακριβώς ένα hub.
- Στη εξίσωση (3.1.3) εξασφαλίζεται πως ο αριθμός των hub είναι ίσος με P .
- Στην (3.1.4) εξασφαλίζεται πως ένας κόμβος i δεν μπορεί να συνδεθεί με κάποιο hub j εκτός και αν έχει εγκατασταθεί το hub στο κόμβο j .
- Στις (3.1.5), (3.1.6) εξασφαλίζεται πως οι μεταβλητές x, y παίρνουν τιμές $0, 1$.

3.1.2 Vehicle Routing Problem – Hub to Spokes

Για την ανάπτυξη του μοντέλου για τη δρομολόγηση των μικρότερων πλοίων από τα Hubs στα αντίστοιχα Spokes το πρόβλημα που μελετάται αντιμετωπίζεται ως ένα πρόβλημα ταυτόχρονης παραλαβής και διανομής επιβατών, το οποίο αποτελεί παραλλαγή του κλασικού προβλήματος παραλαβής και διανομής (vrp with simultaneous pick-up and delivery- VRPSPD).

Όπως και προηγουμένως, ορίζεται ένα σύνολο κόμβων C με πλήθος τα λιμάνια-Spokes 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 πλοίου που έχει επιλεγεί κατά μήκος της ακμής (i, j) . Θεωρούμε το σύνολο W του στόλου των πλοίων που είναι διαθέσιμα. Σε κάθε κόμβο

τα πλοία μπορούν να αποβιβάζουν και να επιβιβάζουν επιβάτες, επομένως η πληρότητα του σκάφους μεταβάλλεται. Τα πλοία αναχωρούν από το κομβικό λιμάνι και επιστρέφουν σε αυτό.

Το πρόβλημα συνεπώς διατυπώνεται μαθηματικά ως εξής:

$$\min \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} \sum_{k \in W} C_{ijk} X_{ijk} + \sum_{j \in C} \sum_{k \in W} X_{0jk} \quad (3.2.1)$$

$$\sum_{i \in C} \sum_{k \in W} X_{ijk} = 1 \quad \forall j \in C \quad (3.2.2)$$

$$\sum_{j \in C} \sum_{k \in W} X_{ijk} = 1 \quad \forall i \in C \quad (3.2.3)$$

$$\sum_{i \in C} X_{ipk} = \sum_{j \in C} X_{pjk} \quad \forall p \in C, k \in W \quad (3.2.4)$$

$$\sum_{i \in C} d_i (\sum_{j \in C} X_{jk}) \leq Q_k \quad \forall k \in W \quad (3.2.5)$$

$$\sum_{j \in C / \{0\}} X_{ojk} \leq 1 \quad \forall k \in W \quad (3.2.6)$$

$$\sum_{i \in C / \{0\}} X_{i0k} \leq 1 \quad \forall k \in W \quad (3.2.7)$$

$$X_{ijk} \in S \quad \forall i \in C, j \in C, k \in W \quad (3.2.8)$$

$$S = \left\{ X_{ijk} : \sum_{i \in B} \sum_{j \in B} X_{ijk} \leq |B| - 1 \text{ for } B \subseteq C / \{0\}; |B| \geq 2 \right\} \quad (3.2.9)$$

$$l_{0k} = \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} d_j X_{ijk} \quad \forall k \in W \quad (3.2.10)$$

$$l_{jk} \geq l_{0k} - d_j + p_j - M(1 - x_{0jk}) \quad \forall j \in C, k \in W \quad (3.2.11)$$

$$l_{jk} \geq l_{ik} - d_j + p_j - M(1 - \sum_{k \in W} x_{ijk}) \quad \forall i, j \in C, i \neq j \quad (3.2.12)$$

$$l_{0k} \leq Q_k \quad \forall k \in W \quad (3.2.13)$$

$$l_{jk} \leq Q_k \quad \forall j \in C, k \in W \quad (3.2.14)$$

Όπου,

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

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

C το σύνολο των κόμβων

W το σύνολο των πλοίων

i,j,p κόμβοι που ανήκουν στο C

k πλοίο που ανήκει στο W

d_i η ζήτηση για τον κόμβο i

Q_k η χωρητικότητα για το πλοίο k

l_{0k} ο αριθμός των επιβατών του πλοίου k μετά την αναχώρηση από το κομβικό λιμάνι

l_{jk} ο αριθμός των επιβατών του πλοίου 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 (3.2.1) ελαχιστοποιεί το μεταφορικό κόστος και τον αριθμό των διαδρομών. Οι περιορισμοί (3.2.2) και (3.2.3) διασφαλίζουν ότι κάθε κόμβος εξυπηρετείται ακριβώς από ένα πλοίο. Ο περιορισμός (3.2.4) εξασφαλίζει ότι κάθε πλοίο εξέρχεται από τον κόμβο στον οποίο εισήλθε, ενώ ο (3.2.5) είναι ο περιορισμός της χωρητικότητας του πλοίου. Ο σκοπός των περιορισμών (3.2.6) και (3.2.7) είναι να διασφαλιστεί ότι δε γίνεται υπέρβαση του μέγιστου αριθμού πλοίων. Οι περιορισμοί (3.2.8) και (3.2.9) είναι οι περιορισμοί εξάλειψης διαδρομών που δεν περιλαμβάνουν όλους τους κόμβους. Η εξίσωση (3.2.10) ορίζει τον αρχικό αριθμό επιβατών των πλοίων. Οι περιορισμοί (3.2.11) και (3.2.12) αντιστοιχούν στον αριθμό των επιβατών για τον πρώτο και τους επόμενους κόμβους (Dethloff, 2001). Οι περιορισμοί (3.13) και (3.14) διασφαλίζουν ότι δε γίνεται υπέρβαση της χωρητικότητας των πλοίων μετά την αποχώρηση από τον πρώτο και τους επόμενους κόμβους και αντικαθιστούν τον περιορισμό (3.2.5) της τυπικής διατύπωσης του προβλήματος. Τέλος, τα πλοία έχουν σταθερή χωρητικότητα και ταχύτητες λειτουργίας και η ζήτηση είναι προκαθορισμένη και είναι όλη από/προς το αρχικό λιμάνι.

3.1.3 Vehicle Routing Problem - Hub to Hub

Στο τελευταίο από τα τρία στάδια που αποτελούν το μεθοδολογικό πλαίσιο της παρούσας εργασίας, επιλύεται το πρόβλημα της δρομολόγησης του μεγάλου πλοίου που συνδέει το αρχικό λιμάνι με τα Hubs που βρεθήκανε στο πρώτο στάδιο. Για την επίλυση του εν λόγω προβλήματος προτείνονται δύο μέθοδοι. Αρχικά με το πρόβλημα του Πλανόδιου Πωλητή και έπειτα ακολουθώντας τη διαδρομή που εξυπηρετεί πρώτα τα λιμάνια με τη μεγαλύτερη ζήτηση. Συγκρίνοντας τα δύο αποτελέσματα επιλέγεται η πιο συμφέρουσα ώστε να ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός του δικτύου Hub&Spoke που απαιτείται.

Το πρόβλημα του Πλανόδιου Πωλητή

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 κόμβοι (πελάτες) με γνωστό κόστος μετακίνησης c_{ij} από τον κόμβο i στον κόμβο j . Ένας πωλητής (όχημα) ξεκινάει από ένα κόμβο (αρχικός κόμβος του δικτύου) κα σκοπός του είναι να επισκεφθεί κάθε κόμβο 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:

$$\min z = \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} C_{ijk} Y_{ijk} \quad (3.3.1)$$

$$\sum_j x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \quad (3.3.2)$$

$$\sum_i x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (3.3.3)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in N/S} x_{ij} \cdot x_{ji} \geq 1 \quad \forall S \subset N (S \neq \emptyset, S \neq N) \quad (3.3.4)$$

$$x_{ij} = 0,1 \quad \forall i, j \in N \quad (3.3.5)$$

Όπου,

z το συνολικό κόστος μετακίνησης

c_{ij} το κόστος μετακίνησης από τον κόμβο i στον κόμβο 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

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

S μη κενό υποσύνολο του N , $S \neq N$

Η εξίσωση (3.3.2) περιορίζει τη ροή από τον ένα κόμβο i προς όλους τους υπόλοιπους προορισμούς σε μία μονάδα. Δηλαδή σε κάθε διαδρομή ο πωλητής θα πρέπει να φεύγει από τον κόμβο i του δικτύου μόνο μία φορά. Αντίστοιχα η εξίσωση (3.3.3) περιορίζει τη ροή προς τον κόμβο j από όλους τους υπόλοιπους προορισμούς σε μία μονάδα, δηλαδή σε κάθε διαδρομή ο πωλητής θα πρέπει να εισέρχεται στον κόμβο j του δικτύου μόνο μία φορά. Η εξίσωση (3.3.4) δείχνει ότι η διαδρομή που τελικά θα ακολουθηθεί πρέπει να περιλαμβάνει επίσκεψη σε κάθε κόμβο ακριβώς μία φορά και η ροή να είναι συνεχόμενη. Έτσι διασφαλίζεται η μη ύπαρξη «υπό-διαδρομών» (sub-tours), διαδρομών δηλαδή που ξεκινούν και επιστρέφουν στον ίδιο κόμβο αλλά δεν περιλαμβάνουν όλους τους κόμβους.

3.2 Περιβάλλον υλοποίησης μοντέλων

Για την υλοποίηση του μοντέλου με το οποίο θα επιλυθεί το πρόβλημα της κατασκευής ακτοπλοϊκού δικτύου στο πλαίσιο Hub&Spoke συστήματος χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Microsoft Excel. Πιο συγκεκριμένα για τα προβλήματα του Hub Location-Allocation καθώς και του Πλανόδιου Πωλητή χρησιμοποιήθηκε το πρόσθετο(add-in) Opensolver 2.9.0 ορίζοντας τις αντίστοιχες αντικειμενικές συναρτήσεις και περιορισμούς που ήταν απαραίτητοι.

Αντιθέτως για το πρόβλημα της βέλτιστης δρομολόγησης των πλοίων από τους κόμβους των Hub προς τους κόμβους των Spokes, κατέστη αναγκαίο για την εργασία να προγραμματιστούν ειδικές συναρτήσεις που θα υπολογίζουν όλες τις απαραίτητες μεταβλητές για την εύρεση του τελικού αποτελέσματος. Αυτές οι συναρτήσεις δημιουργήθηκαν μέσω του λογισμικού Visual Basic for Applications (VBA) σε περιβάλλον Microsoft Excel.

Η γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic αποτελεί την πλέον διαδεδομένη υλοποίηση μιας αντικειμενοστραφούς γλώσσας προγραμματισμού σε περιβάλλον MS-Windows. Ακόμη, αποτελεί μέλος της ομάδας προγραμμάτων του Microsoft® Visual Studio και τη μετεξέλιξη της παλαιότερης έκδοσής της με το όνομα GW Basic. Είναι μια πλούσια γλώσσα προγραμματισμού, με την κύρια διαφοροποίηση της από τις άλλες γλώσσες υψηλού επιπέδου προγραμματισμού να έγκειται στο ολοκληρωμένο περιβάλλον αναπτύξεως λογισμικού που παρέχει και επιτρέπει τη

γραφική σύνθεση διαφόρων στοιχείων που αποτελούν μέσο επικοινωνίας με τον χρήστη του τελικού προγράμματος. Με τον όρο γλώσσα υψηλού επιπέδου προγραμματισμού εννοείται μια γλώσσα προγραμματισμού με αριθμητικά και γλωσσικά στοιχεία συνηθισμένα σε επιστήμονες και τεχνικούς, η οποία επιτρέπει εύκολα τη δημιουργία προγραμμάτων και εφαρμογών χωρίς την απαίτηση γνώσης της εσωτερικής δομής και λειτουργίας του υπολογιστή. Το όνομα της γλώσσας αυτής προέρχεται από το Visual (Οπτική) BASIC (Beginners All Purpose Symbolic Instruction Code), που όπως υποδεικνύουν και τα αρχικά της δίνει τη δυνατότητα για συγγραφή κώδικα για κάθε χρήση, από όχι απαραίτητα επαγγελματίες προγραμματιστές. Είναι ακόμη πολύ χρήσιμη στην έκφραση μαθηματικών τύπων και στον χειρισμό συμβολοσειρών.

Στη συγκεκριμένη μελέτη, χρησιμοποιείται η Visual Basic for Applications (VBA) η οποία ουσιαστικά αποτελεί μια εξειδικευμένη μορφή της Microsoft Visual Basic. Δημιουργήθηκε με βάση την γνωστή Visual Basic και χρησιμοποιεί πληθώρα ίδιων ή παρόμοιων χαρακτηριστικών και παρόμοιο σχεδιαστικό περιβάλλον. Η VBA δεν υπάρχει σαν ξεχωριστό λογισμικό, αλλά είναι ενσωματωμένη σε άλλα προγράμματα όπως MSOffice, Star Office, AutoCAD, MicroStation κτλ. Κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται για την αυτοματοποίηση κάποιων διαδικασιών (ή την προσθήκη κάποιων) οι οποίες συνήθως είναι λειτουργίες που χρησιμεύουν στο συγκεκριμένο κάθε φορά πρόβλημα. Συνεπώς, η βασική λειτουργία της VBA, και ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος, είναι η δυνατότητα να κατασκευαστούν κάθε φορά συναρτήσεις οι οποίες δεν υπάρχουν εκ των προτέρων, αλλά δημιουργούνται από τον χρήστη (User Defined Functions – UDFs). Για να κατασκευαστεί μια τέτοια συνάρτηση, απαιτείται να καθοριστούν από το χρήστη τα εξής:

- Το όνομα της συνάρτησης, με το οποίο η συνάρτηση θα καλείται κάθε φορά στο εκάστοτε φύλλο εργασίας.
- Τα ορίσματα της συνάρτησης τα οποία πρακτικά αποτελούν τις μεταβλητές εισόδου της. Ως όρισμα μπορεί να εισαχθεί όχι μόνο μεμονωμένη τιμή, αλλά και ολόκληρη περιοχή κελιών (range). Επιπλέον, είναι απαραίτητο να καθοριστεί το είδος των μεταβλητών εισόδου: integer, single, double, string κ.λπ..
- Ο κώδικας της συνάρτησης, που θα υποδεικνύει τι ενέργειες θα εκτελεί η συνάρτηση κάθε φορά που θα καλείται. Συνίσταται οι μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν στον κώδικα να δηλώνονται στην αρχή αυτού, όπως επίσης και το είδος αυτών.

3.3 Γενετικοί αλγόριθμοι

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι αποτελούν ένα σύστημα επίλυσης προβλημάτων αναζήτησης και βελτιστοποίησης, βασισμένο στις αρχές της Φυσικής Εξέλιξης. Οι αλγόριθμοι αυτοί ανήκουν στην κατηγορία των εξελικτικών αλγόριθμων, που με τη σειρά τους ανήκουν στους Μεταευρετικούς αλγόριθμους. Πλέον είναι ευρέως διαδεδομένοι κυρίως λόγω του στοχαστικού χαρακτήρα που ακολουθούν κατά την επαναληπτική διαδικασία που πραγματοποιούν για την εύρεση της βέλτιστης λύσης στο εκάστοτε πρόβλημα.

Παρόλο που η πρώτη εμφάνιση των Γενετικών Αλγορίθμων (Γ.Α.) πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 1950, έπρεπε να περάσουν αρκετά χρόνια για τη συστηματική ανάπτυξη τους, συγκεκριμένα από τον John Holland και τους συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο του Michigan (1975). Ο στόχος του Holland κατά την έρευνα του δεν ήταν αρχικά ο σχεδιασμός αλγόριθμου επίλυσης προβλημάτων αλλά η συστηματική μελέτη της διαδικασίας της φυσικής προσαρμογής και η σχεδίαση λογισμικού που διατηρεί τους σημαντικότερους από τους μηχανισμούς φυσικών συστημάτων. Στο βιβλίο του «Adaptation in Natural and Artificial Systems» (Holland 1975), περιέγραψε τους Γενετικούς Αλγορίθμους ως απλοποιημένη εκδοχή της βιολογικής εξέλιξης.

Η κεντρική ιδέα των Γ.Α. λοιπόν προέρχεται από τη θεωρία της Εξέλιξης (Evolution) του Δαρβίνου, κατά την οποία ένας αρχικός πληθυσμός ατόμων εξελίσσεται σε έναν νέο πληθυσμό, μέσω των διαδικασιών της «Φυσικής Επιλογής» και των «Γενετικών Τελεστών» (Γεωργόπουλος και Λυκοθανάσης, 1999). Έτσι λοιπόν η ορολογία των Γ.Α. προέρχεται από τον χώρο της Φυσικής Γενετικής. Σε αυτούς αναφέρονται τα άτομα (individuals) ή οι γενότυποι (genotypes) που βρίσκονται μέσα σε έναν πληθυσμό. Κάθε άτομο ή γενότυπος αποτελείται από χρωμοσώματα (chromosomes). Τα χρωμοσώματα με τη σειρά τους αποτελούνται από γονίδια (genes) καθένα από τα οποία καθορίζει ένα χαρακτηριστικό του ατόμου και βρίσκονται σε συγκεκριμένες θέσεις του χρωμοσώματος, που καλούνται loci. Οι διαφορετικές καταστάσεις που μπορεί να πάρει κάθε φορά το γονίδιο ονομάζονται alleles.

Ο κάθε γενότυπος αντιστοιχεί σε μια από τις πιθανές λύσεις ενός προβλήματος. Οι Γ.Α., σε αντίθεση με άλλες μεθόδους αναζήτησης, διατηρούν έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων, τον οποίο και επεξεργάζονται. Έτσι, ο πληθυσμός υφίσταται μια προσομοιωμένη γενετική εξέλιξη, η οποία ουσιαστικά αντιστοιχεί σε μια εκτενή αναζήτηση στο χώρο για πιθανές λύσεις. Κατά την αναζήτηση, σε κάθε γενιά, οι “καλές” λύσεις αναπαράγονται και μένουν στον αλγόριθμο, ενώ οι “κακές” απομακρύνονται. Ο έλεγχος των πιθανών λύσεων γίνεται μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης (objective/fitness function), η οποία παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος στο οποίο αναπτύσσεται ο πληθυσμός. Οι λύσεις που επιλέγονται κάθε φορά να παραμείνουν στον αλγόριθμο αναπαράγονται στην επόμενη γενιά λύσεων και λαμβάνουν μια τυχαία μετάλλαξη. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για αρκετές γενιές, οπότε 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.

Η διαδικασία που ακολουθείται από τους γενετικούς αλγόριθμους για την επίλυση διαφόρων προβλημάτων αποτελείται συνήθως από τα παρακάτω βήματα (Γεωργόπουλος και Λυκοθανάσης, 1999):

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

3.3.1 Κωδικοποίηση της λύσης

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για την βέλτιστη επίλυση ενός προβλήματος με τη χρήση γενετικού αλγόριθμου είναι ο τρόπος με τον οποίο θα κωδικοποιηθούν- αναπαρασταθούν οι υποψήφιες λύσεις του προβλήματος, η γενετική αναπαράσταση των λύσεων όπως ονομάζεται. Υπάρχουν πολλοί τρόποι αναπαράστασης των υποψήφιων λύσεων, όπως για παράδειγμα η μετατροπή των μεταβλητών σχεδιασμού σε μια σειρά δυαδικών ψηφίων (0,1) (bit string), η χρήση ακέραιων ή πραγματικών αριθμών ή ακόμη και η χρήση χαρακτήρων όπως τα γράμματα της αλφαβήτου. Ακόμη υπάρχουν και πιο πολύπλοκοι τρόποι γενετικής αναπαράστασης όπως για παράδειγμα η δένδροειδής κωδικοποίηση. Όταν πραγματοποιείται κωδικοποίηση συνεχών μεταβλητών με χρήση δυαδικών διανυσμάτων, η ακρίβεια της αναπαράστασης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό των δυαδικών ψηφίων που χρησιμοποιούνται. Συνεπώς με την αύξηση των δυαδικών ψηφίων που χρησιμοποιούνται, η ακρίβεια της αναπαράστασης μεγαλώνει.

3.3.2 Καταρτισμός αρχικού πληθυσμού (Αρχικοποίηση)

Αποτελεί ουσιαστικά το πρώτο στάδιο της επαναληπτικής διαδικασίας, στο οποίο παράγεται τυχαία ένας πληθυσμός από υποψήφιες πιθανές λύσεις. Κάθε μέλος του πληθυσμού αντιστοιχεί σε μια σειρά δυαδικών ψηφίων καθορισμένου μήκους, η οποία αποτελεί την κωδικοποίηση του συνόλου των μεταβλητών σχεδιασμού του προβλήματος. Κάθε μια από αυτές τις σειρές ονομάζεται χρωμόσωμα.

Η επίλυση προβλημάτων με τη χρήση γενετικών αλγόριθμων απαιτεί τον καθορισμό του μεγέθους του πληθυσμού, του αριθμού δηλαδή των χρωμοσωμάτων που αποτελούν τον πληθυσμό κατά το αρχικό στάδιο, αυτό του καταρτισμού του αρχικού πληθυσμού. Αυτό αποτελεί ένα σημαντικό χαρακτηριστικό καθώς ορίζεται από την

αρχή του προβλήματος και δε μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια, συνεπώς είναι απαραίτητο το μέγεθος του πληθυσμού να επιλεγεί σωστά. Πληθυσμοί αποτελούμενοι από μικρό αριθμό χρωμοσωμάτων, παρόλο που ολοκληρώνουν τη διαδικασία του αλγορίθμου αρκετά γρήγορα, η λύση που παράγουν βρίσκεται συχνά σε τοπικά ακρότατα. Ακόμη μικροί πληθυσμοί έχουν μειωμένες πιθανότητες ολοκλήρωσης της διαδικασίας της διασταύρωσης, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα να μην εξετάζεται ολόκληρος ο χώρος αναζήτησης. Αντίθετα πληθυσμοί με μεγάλο αριθμό χρωμοσωμάτων παρότι εξαλείφουν τα παραπάνω προβλήματα, απαιτούν περισσότερο χρόνο για την ολοκλήρωση της αναζήτησης της βέλτιστης λύσης. Θεωρείται ότι σε γενικές περιπτώσεις, ο βέλτιστος αριθμός χρωμοσωμάτων σε έναν πληθυσμό είναι περίπου στα 20-30 ή το πολύ σε 50-100, για πολύπλοκα προβλήματα.

3.3.3 Αποτίμηση πληθυσμού μέσω συνάρτησης ικανότητας

Απαραίτητο και πολύ σημαντικό παράγοντα για την επίλυση του προβλήματος αποτελεί ο καθορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε μέλος του πληθυσμού, δηλαδή της προς βελτιστοποίηση συνάρτησης. Ο υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης κάθε χρωμοσώματος που αντιστοιχεί σε ένα μέρος του συνόλου των παραμέτρων σχεδιασμού είναι ανεξάρτητος από τις τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού άλλων μελών του σχεδιασμού. Αυτό που ορίζεται όμως σε συνάρτηση με τα υπόλοιπα μέλη του πληθυσμού είναι η ποιότητα και η βαθμονόμηση ενός μέλους. Στον απλό γενετικό αλγόριθμο η ποιότητα του μέλους ορίζεται από το πηλίκο:

$$P = \frac{F_i}{F}$$

F_i η μέση τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης όλων των μελών του πληθυσμού F

F η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που αντιστοιχεί στο χρωμόσωμα i

3.3.4 Επιλογή

Η εφαρμογή του τελεστή της επιλογής είναι η διαδικασία κατά την οποία επιλέγονται τα χρωμοσώματα από τον πληθυσμό που θα αναπαραχθούν και θα συνεχίσουν στον αλγόριθμο. Τα ικανότερα χρωμοσώματα είναι και εκείνα με τις περισσότερες πιθανότητες να επιλεγθούν για αναπαραγωγή. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι σκοπός της διαδικασίας της επιλογής είναι επιλέγονται τα «ικανότερα» χρωμοσώματα του κάθε πληθυσμού. Θα πρέπει όμως να διατηρείται μια ισορροπία κατά την επιλογή καθώς υπάρχει πιθανότητα ο πληθυσμός να αποτελείται από ιδιαίτερα «ικανά» χρωμοσώματα, αλλά όχι βέλτιστα, μειώνοντας έτσι την ποικιλομορφία του πληθυσμού, η οποία είναι απαραίτητη. Τέλος αποτελεί μια από τις βασικότερες διαδικασίες του αλγορίθμου και εφαρμόζεται σε αυτόν μέσω του ομώνυμου τελεστή.

Έχουν προταθεί πολλές διαδικασίες επιλογής του πληθυσμού, με τις κυριότερες να αναφέρονται παρακάτω (Michalewicz, 1996):

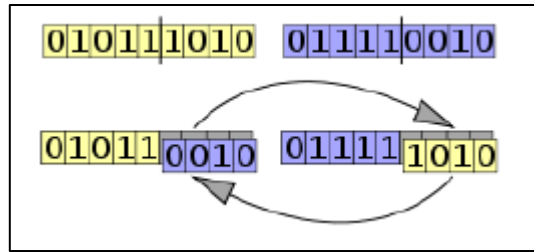
- **Αποδεκατισμός πληθυσμού (Population Decimation):** Αποτελεί την απλούστερη ντετερμινιστική μέθοδο κατά την οποία επιβιώνουν τα χρωμοσώματα με τη βέλτιστη τιμή της συνάρτησης κόστους, ενώ απομακρύνονται αυτά με τη χειρότερη τιμή. Ο πληθυσμός με τη διαδικασία της αναπαραγωγής αποδεκατίζεται και ξαναδημιουργείται. Αρχικά τα άτομα κατατάσσονται σε φθίνουσα σειρά σε σχέση με τη συνάρτηση κόστους. Επιλέγεται μια τιμή σαν τιμή κατωφλίου και όσα χρωμοσώματα με συνάρτηση κόστους μικρότερη της τιμής αυτής, απομακρύνονται από τον πληθυσμό.
- **Αναλογική επιλογή (Proportionate selection):** Η πιο διαδεδομένη διαδικασία αυτής της κατηγορίας είναι η μέθοδος της ρουλέτας με σχισμές (slotted roulette wheel), στην οποία κάθε μέλος του πληθυσμού αντιστοιχίζεται σε ένα κομμάτι της ρουλέτας, με το μέγεθός του να καθορίζεται από το μέγεθος της ικανότητας του. Η ρουλέτα περιστρέφεται τόσες φορές όσες και ο αριθμός των χρωμοσωμάτων του εκάστοτε πληθυσμού, με το χρωμόσωμα που επιλέγεται από κάθε περιστροφή να αποτελεί τον γονέα για τον επόμενο πληθυσμό. Στην περίπτωση αυτή κάθε χρωμόσωμα έχει τη δυνατότητα να επιλεγεί περισσότερες από μια φορές, έτσι η πιθανότητα επιλογής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα του.
- **Διαβάθμιση Σίγμα (Sigma Scaling):** Η μέθοδος της Διαβάθμισης Σίγμα αποτελεί μια μέθοδο επιλογής η οποία αντιμετωπίζει το φαινόμενο της πρώιμης σύγκλισης. Σε αυτή κρατείται ο βαθμός με τον οποίο τα κατάλληλα άτομα συμμετέχουν στη δημιουργία απογόνων, σε ίδιο επίπεδο καθ'όλη τη διάρκεια εξέλιξης του αλγόριθμου, χωρίς να μεταβάλλεται από τη διασπορά των τιμών της συνάρτησης κόστους. Η αναμενόμενη τιμή κάθε ατόμου καθορίζεται από την τιμή της συνάρτησης κόστους του $f(i)$, τη μέση τιμή της συνάρτησης κόστους του πληθυσμού $f(t)$ και την τυπική απόκλιση του πληθυσμού $s(t)$ σε χρόνο t .
- **Επιλογή Boltzmann:** Σε αντίθεση με τη Διαβάθμιση Σίγμα στην οποία η πίεση παραμένει επιλογής σταθερή, στην επιλογή Boltzmann υπάρχει διαφοροποίηση στην πίεση επιλογής κατά τη διάρκεια της εξέλιξης. Στη διαδικασία αυτή συνεπώς υπάρχει μια μεταβλητή, της «θερμοκρασίας» που ελέγχει το ρυθμό της επιλογής. Αρχικά η μεταβλητή αυτή έχει υψηλή τιμή ώστε η πίεση της επιλογής να είναι χαμηλή (που σημαίνει ότι κάθε άτομο έχει την πιθανότητα να μετέχει στην αναπαραγωγή). Μετά η μεταβλητή της «θερμοκρασίας» μειώνεται σταδιακά, αυξάνοντας την πίεση της επιλογής, κάτι που δίνει τη δυνατότητα στον γενετικό αλγόριθμο να βρει τη βέλτιστη περιοχή του χώρου αναζήτησης.
- **Επιλογή με βαθμονόμηση (Ranking selection):** Στη μέθοδο αυτή τα χρωμοσώματα ταξινομούνται σε σχέση με το μέτρο της συνάρτησης-

ικανότητας κόστους και λαμβάνουν έναν αύξοντα αριθμό. Συνεπώς, η αξία κάθε χρωμοσώματος ρυθμίζεται από το βαθμό του, ενώ το πλήθος των αντιγράφων με τα οποία κάθε μέλος θα αντιπροσωπεύεται στον ενδιάμεσο πληθυσμό εξαρτάται από τον αύξοντα αριθμό κατά την ταξινόμηση.

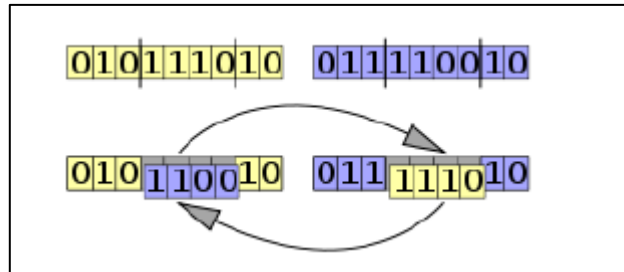
- **Επιλογή με τουρνουά (Tournament selection):** Στη συγκεκριμένη διαδικασία πραγματοποιείται τυχαία επιλογή ενός αριθμού χρωμοσωμάτων, με το ικανότερο από αυτά να επιλέγεται ως γονέας. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται όσες φορές είναι και το μέγεθος του πληθυσμού, με κάθε επανάληψη να μην εξαρτάται από προηγούμενες.
- **Ελιτισμός (Elitism):** Αποτελεί μια μέθοδο επιλογής που αναγκάζουν τον γενετικό αλγόριθμο να κρατάει έναν αριθμό καλύτερων ατόμων σε κάθε γενιά. Τα άτομα αυτά ή θα χαθούν αν δεν επιλεγούν καθόλου ή θα καταστραφούν με τη μετάλλαξη και τη διασταύρωση, και γι αυτό τον λόγο ο αλγόριθμος τα μεταφέρει αυτούσια στην επόμενη γενιά.
- **Κανονικοποιημένη γεωμετρική βαθμονόμηση (normalized geometric ranking):** Αποτελεί μια ακόμη πιο επιθετική μορφή επιλογής, στην οποία τα άτομα του πληθυσμού βαθμολογούνται από το καλύτερο προς το χειρότερο σε σχέση με την τιμή της συνάρτησης κόστους. Έτσι η κανονικοποιημένη γεωμετρική βαθμονόμηση υπολογίζει την πιθανότητα επιλογής κάθε χρωμοσώματος.
- **Επιλογή σταθερής κατάστασης (Steady-state selection):** Σε αντίθεση με τις περισσότερες μεθόδους επιλογής, σε αυτή τη μέθοδο δεν αντικαθιστούνται όλα τα άτομα σε κάθε γενιά άλλα λίγα από αυτά. Έτσι ένας μικρός αριθμός από τα λιγότερο κατάλληλα άτομα αντικαθιστούνται από απογόνους των πιο ισχυρών χρωμοσωμάτων.

3.3.5 Διασταύρωση

Η διαδικασία της διασταύρωσης εφαρμόζεται με τη χρήση του ομώνυμου τελεστή στον αλγόριθμο και αποτελεί το βασικότερο ίσως χαρακτηριστικό που ξεχωρίζει τους γενετικούς από τους υπόλοιπους εξελικτικούς αλγόριθμους. Στο κομμάτι αυτό επιλέγεται τυχαία μια θέση και ανταλλάσσονται οι αλυσίδες των γονιδίων πριν ή/και ανάμεσα σε δυο χρωμοσώματα στη θέση αυτή, για να παραχθούν δυο απόγονοι. Αρχικά επιλέγονται τα δυο χρωμοσώματα που θα διασταυρωθούν με κάποια πιθανότητα p_c . Στην πιο απλή μορφή της διαδικασίας επιλέγεται τυχαία ένα σημείο-θέση που θα διασταυρωθεί, ώστε να ανταλλάξουν τα αντίστοιχα χρωμοσώματα και να παράξουν απογόνους. Υπάρχει όμως και η δυνατότητα να διασταυρωθούν τυχαία δύο σημεία για να αλλάξουν χρωμοσώματα και να παράξουν απογόνους, κάτι που χρησιμοποιείται ευρέως σε πρακτικές εφαρμογές.



Εικόνα 3.1: Διασταύρωση ενός σημείου



Εικόνα 3.2: Διασταύρωση δύο σημείων

3.3.6 Μετάλλαξη

Ο τελεστής της μετάλλαξης αλλάζει τυχαία την τιμή κάποιων γονιδίων στο χρωμόσωμα. Είναι μια απαραίτητη διαδικασία για τον αλγόριθμο που εξασφαλίζει ουσιαστικά την ύπαρξη μιας μόνιμης κατάστασης σε κάποια θέση και θα μπορούσαμε να πούμε πως λειτουργεί υποστηρικτικά στην διαδικασία της διασταύρωσης. Πιο συγκεκριμένα κατά τη διάρκεια της γενετικής αναπαράστασης με δυαδικό σύστημα, επιλέγονται κάποια δυαδικά ψηφία του πληθυσμού με μικρή πιθανότητα, η οποία δεν ξεπερνά συνήθως το 1%, και αντιστρέφονται, συμβάλλοντας έτσι στην διαφορετικότητα του πληθυσμού.

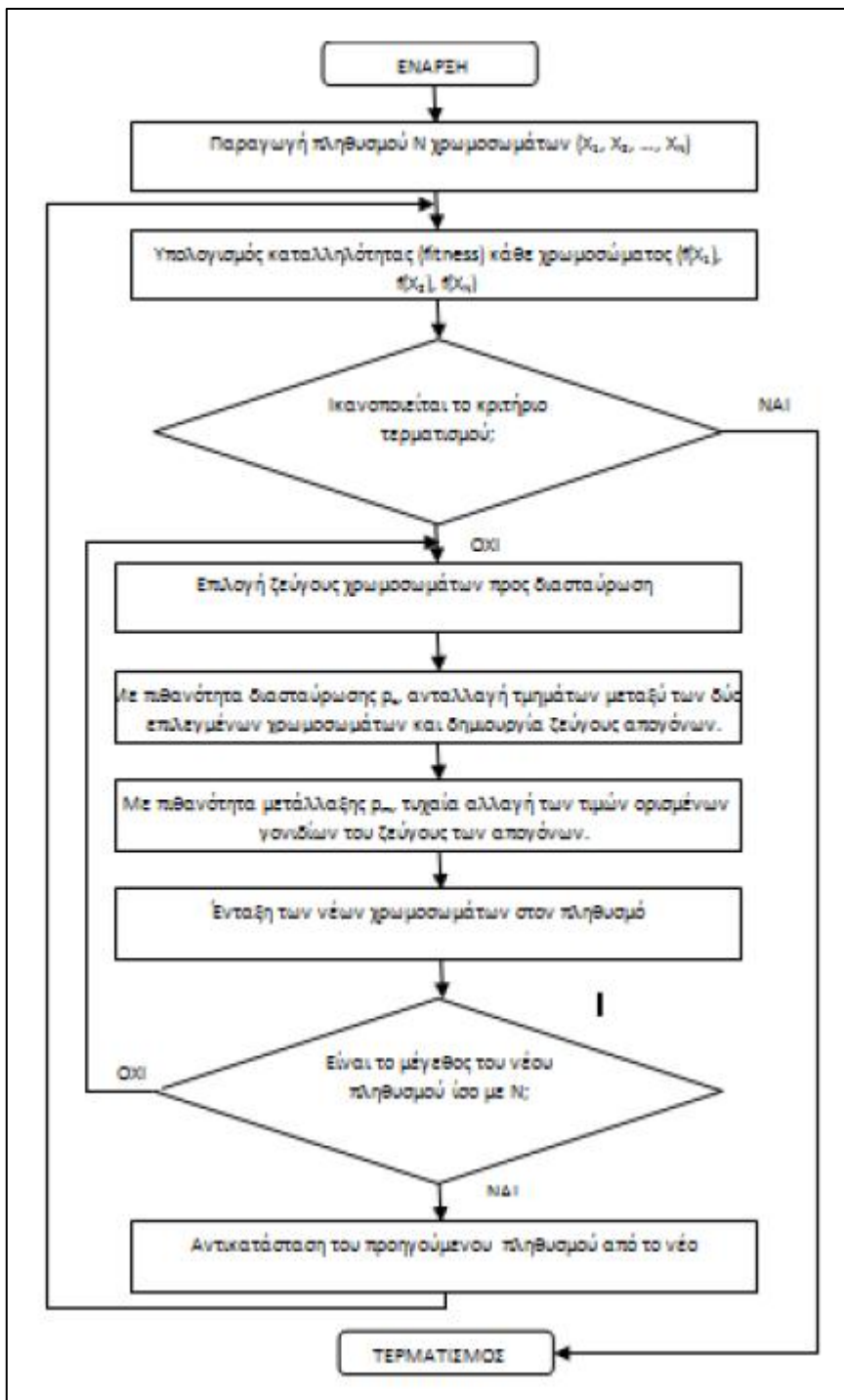


Εικόνα 3.3: Τυχαία μετάλλαξη

(Πηγή: Βελτιστοποίηση Συστημάτων & Υδροπληροφορική, Χρήστος Μακρόπουλος & Ανδρέας Ευστρατιάδης 2011)

3.3.7 Διάγραμμα ροής τυπικού γενετικού αλγορίθμου

Επιπρόσθετα, στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής ενός τυπικού γενετικού αλγορίθμου.



Εικόνα 3.4: Διάγραμμα ροής τυπικού Γενετικού Αλγορίθμου
(Πηγή: Μακρόπουλος και Ευστρατιάδης, 2011)

3.3.8 Πλεονεκτήματα γενετικών αλγορίθμων

Η χρήση γενετικών αλγορίθμων για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, με τα σημαντικότερα από τα οποία να είναι τα εξής (Γενετικοί Αλγόριθμοι και Εφαρμογές, Λυκοθανάσης, 2001, σελ:25):

- Μπορούν να επιλύσουν σε σύντομο χρόνο και αξιόπιστα πολύπλοκα προβλήματα. Ένας από τους σημαντικούς λόγους που η χρήση των γενετικών αλγορίθμων είναι ευρεία στις μέρες μας είναι η μεγάλη τους αποδοτικότητα. Έχει αποδειχθεί από πολλές πρακτικές εφαρμογές ότι προβλήματα που έχουν πολλές, δύσκολα προσδιορισμένες, λύσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν καλύτερα από ΓΑ. Ακόμη, είναι άξιο αναφοράς πως συναρτήσεις που παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις και καθιστούν ανεπαρκείς άλλες μεθόδους στην εύρεση των ακρότατων τους, για τους ΓΑ αυτές οι διακυμάνσεις δεν αποτελούν σημεία δυσχέρειας.
- Είναι εύκολα συνεργάσιμοι με τα υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα των ΓΑ είναι πως μπορούν να χρησιμοποιηθούν με προσθετικό τρόπο στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται σήμερα, μη απαιτώντας την επανασχεδίαση τους, απλά με την εγκατάστασή τους σε αυτά. Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τον υπάρχοντα κώδικα. Αυτό συμβαίνει, 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.
- Παρέχουν πάρα πολλές δυνατότητες εξέλιξης. Οι ΓΑ είναι ευέλικτοι αλγόριθμοι στους οποίους μπορούν να πραγματοποιηθούν εύκολα αλλαγές, επεκτάσεις και μετεξελίξεις, ανάλογα με την κρίση του σχεδιαστή. Σε πολλές εφαρμογές, έχουν αναφερθεί λειτουργίες των ΓΑ, που δεν είναι αντιγραμμένες από τη φύση ή που έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές, πάντα προς όφελος της απόδοσης. Σε πολλές περιπτώσεις ακόμα, όχι απλά είναι δυνατό αλλά είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν αλλαγές στους αλγορίθμους για να επιλυθεί κάποιο πρόβλημα.
- Υπάρχει η δυνατότητα για συμμετοχή σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους. Παρόλο που η ισχύς των ΓΑ είναι μεγάλη, σε μερικές ειδικές περιπτώσεις προβλημάτων, στις οποίες κάποιες άλλες μέθοδοι επίλυσης, λόγω της εξειδίκευσής τους, μπορεί είναι πολύ αποδοτικές υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης ενός υβριδικού σχήματος ΓΑ με άλλη μέθοδο. Αυτό είναι καθίσταται δυνατό λόγω της μεγάλης ευελιξίας των ΓΑ.
- Βρίσκουν εφαρμογή σε πάρα πολλά πεδία, ειδικά σε σχέση με άλλες μεθόδους. Αυτό το πλεονέκτημα έναντι άλλων μεθόδων δίνεται κυρίως λόγω της ελευθερίας επιλογής των κριτηρίων που καθορίζουν την επιλογή μέσα στο τεχνικό περιβάλλον. Έτσι, ΓΑ μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην οικονομία,

στο σχεδιασμό μηχανών, στην επίλυση μαθηματικών εξισώσεων, στην εκπαίδευση Νευρωνικών Δικτύων και σε πολλούς άλλους τομείς.

- Δεν απαιτούν περιορισμούς στις συναρτήσεις που επεξεργάζονται. Ο σημαντικότερος λόγος για τον οποίο πολλές άλλες μέθοδοι κρίνονται ακατάλληλες για πολλά προβλήματα είναι η απαίτησή τους για ύπαρξη περιορισμών, όπως ύπαρξη παραγώγων, συνέχεια, όχι «θορυβώδεις» συναρτήσεις κτλ. Τέτοιοι περιορισμοί δεν απαιτούνται για τη χρήση ΓΑ, κάτι που τους κρίνει κατάλληλους για πολλών ειδών προβλήματα.
- Δεν παίζει ρόλο η σημασία της εκάστοτε υπό εξέταση πληροφορίας. Η μόνη «επικοινωνία» που έχει ο ΓΑ με το περιβάλλον του προβλήματος είναι μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτό εγγυάται την επιτυχία του ανεξάρτητα από τη σημασία του προβλήματος. Φυσικά υπάρχουν προβλήματα στα οποία οι ΓΑ αδυνατούν να βρουν λύση, ο λόγος όμως που συμβαίνει δεν είναι το πληροφοριακό περιεχόμενο του προβλήματος αλλά η φύση του χώρου που ερευνούν.
- Έχουν από τη φύση τους το στοιχείο του παραλληλισμού. Σε κάθε στάδιο οι ΓΑ επεξεργάζονται μεγάλες ποσότητες πληροφορίας, αφού κάθε άτομο θεωρείται αντιπρόσωπος πολλών άλλων. Αυτό τους δίνει τη δυνατότητα να καλύπτουν μεγάλους χώρους με σύντομους χρόνους πολύ αποδοτικά.
- Αποτελούν τη μοναδική μέθοδο που πραγματοποιεί ταυτόχρονα εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και εκμετάλλευση της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας. Αυτά τα δυο χαρακτηριστικά τις περισσότερες φορές είναι ανταγωνιστικά, όμως η επιτυχής συνύπαρξη και αλληλεπίδραση τους ωφελούν σε μεγάλο βαθμό τη διαδικασία. Εκεί έγκειται η μεγάλη αποδοτικότητα και ελκυστικότητα των ΓΑ, στον βέλτιστο συνδυασμό των δυο αυτών χαρακτηριστικών.

3.4 Εφαρμογή Γενετικού Αλγορίθμου

Για την επίλυση του προβλήματος επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το λογισμικό Evolver, το οποίο έχει αναπτυχθεί από την εταιρία Palisade και επιλύει προβλήματα με χρήση γενετικών αλγορίθμων. Το λογισμικό αυτό αποτελεί πρόσθετο πρόγραμμα του υπολογιστικού λογισμικού Microsoft Excel για λύση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Μέσω του Excel εισάγονται τα δεδομένα και οι συναρτήσεις οι οποίες εμφανίζονται στα κελιά του προγράμματος. Οι τιμές των δεδομένων αυτών μεταβάλλονται με τη χρήση του Evolver μέχρι να επιτευχθεί ο στόχος του προβλήματος, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που έχουν τεθεί και τις τιμές των παραμέτρων του γενετικού αλγορίθμου.

3.4.1 Χαρακτηριστικά γενετικού αλγορίθμου

Αναπαράσταση της λύσης

Κάθε χρωμόσωμα αναπαριστά μια ακολουθία κόμβων, η οποία ερμηνεύεται ως η σειρά με την οποία ένα πλοίο πρέπει να επισκεφτεί όλους τους κόμβους, εάν το ίδιο πλοίο έπρεπε να πραγματοποιήσει όλες τις διαδρομές διαδοχικά (Bjarnadottir, 2003). Για ένα σύνολο κόμβων έστω $n=10$, ένα πιθανό χρωμόσωμα θα μπορούσε να είναι:

$$[1 \ 2 \ 3 \ 9 \ 8 \ 7 \ 6 \ 5 \ 4 \ 10]$$

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

$$0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 9 \rightarrow 0$$

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

$$0 \rightarrow 8 \rightarrow 7 \rightarrow 6 \rightarrow 5 \rightarrow 0$$

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 πλοίων.

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, καθώς και του αριθμού των διαδρομών. Το μέτρο της συνάρτησης ικανότητας δίνεται από τη σχέση:

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

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

Αρχικός Πληθυσμός-Επιλογή

Ο αρχικός πληθυσμός παράγεται τυχαία. Το μέγεθος του πληθυσμού παίρνει τις τιμές 25, 50, 75. 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).

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]

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]

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.

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

Ο αλγόριθμος υπολογίζει για κάθε κόμβο που αποτελεί την ακολουθία του χρωμοσώματος, το άθροισμα των επιβατών με αφετηρία το κομβικό λιμάνι, το άθροισμα των επιβατών με προορισμό το κομβικό λιμάνι καθώς και το άθροισμα όσων επιβατών έχουν ανέβει στα προηγούμενα λιμάνια και έχουν προορισμό το κομβικό λιμάνι συν τον αριθμό των επιβατών που έχουν ως προορισμό το συγκεκριμένο λιμάνι.

Βήμα 3: Ολοκλήρωση διαδρομής

Εάν παραβιάζονται εξ αρχής οι περιορισμοί χωρητικότητας, ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα 1 και θέτει το λιμάνι ως πρώτο στην επόμενη διαδρομή. Εφόσον δεν παραβιάζονται οι περιορισμοί χωρητικότητας, το λιμάνι προστίθεται στη διαδρομή. 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.

Τερματισμός γενετικού αλγορίθμου

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η εφαρμογή του μεθοδολογικού πλαισίου που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο την περιοχή μελέτης της εν λόγω εργασίας, όπου επιλέχθηκαν 30 λιμάνια στην ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου Πελάγους. Συγκεκριμένα, αρχικά παρουσιάζεται η γεωγραφική θέση της περιοχής μελέτης και έπειτα αναλύονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των αντίστοιχων αλγορίθμων για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής στο πλαίσιο του δικτύου Hub&Spoke. Αξίζει να σημειωθεί πως η επίλυση έγινε για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις πλήθους Hub, δηλαδή για δύο(2), τρία (3) και τέσσερα (4) Hub. Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας για τις παραμέτρους του γενετικού που δίνουν τη βέλτιστη διαδρομή, με διάφορες μεταβλητές του προβλήματος. Τέλος, παρουσιάζονται κάποια συμπεράσματα σχετικά με την εφαρμογή της εν λόγω μεθοδολογίας στο σχεδιασμό ακτοπλοϊκού δικτύου στην προαναφερθείσα περιοχή μελέτης.

4.1 Περιοχή μελέτης

Στην ενότητα αυτή, περιγράφεται η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε για την εφαρμογή των αντίστοιχων αλγορίθμων για την επίλυση του προβλήματος που έχει τεθεί στο πλαίσιο της εν λόγω διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα η περιοχή μελέτης αποτελείται από τα 30 λιμάνια με αφετηρία το λιμάνι του Λαυρίου, τα οποία και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.1: Λιμάνια περιοχής μελέτης

	Λιμάνι		Λιμάνι
1	Αμοργός	16	Λήμνος
2	Άνδρος-Γαύριο	17	Μήλος
3	Αστυπάλαια	18	Μύκονος
4	Ηράκλειο	19	Μυτιλήνη
5	Θήρα	20	Νάξος
6	Ικαρία	21	Πάρος
7	Ίος	22	Ρέθυμνο
8	Κάλυμνος	23	Ρόδος
9	Κάρπαθος	24	Σάμος
10	Καστελόριζο	25	Σέριφος
11	Κύθηρα-Διακοφτί	26	Σίφνος
12	Κύθνος	27	Σκύρος
13	Κως	28	Σύρος
14	Λαύριο	29	Τήνος
15	Λέρος	30	Χίος

Στον παρακάτω χάρτη παρουσιάζονται οι εν λόγω κόμβοι.



Χάρτης 4.1: Περιοχή Μελέτης

Βάσει των παραπάνω γίνεται εύκολα αντιληπτό πως το σύνολο των λιμανιών που επιλέχθηκαν αποτελούν μια καλή προσέγγιση της περιοχής του Αιγαίου.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα οι αποστάσεις (σε ναυτικά μίλια) κάθε λιμανιού τόσο από την αφετηρία-Λαύριο όσο και από κάθε άλλο λιμάνι. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων-λιμανιών είναι απαραίτητες για την επίλυση του προβλήματος.

Πίνακας 4.2: Αποστάσεις μεταξύ λιμανιών(Ναυτικά Μίλια)

Λαυρίο		Rethimno	Iraklio	Kithira	Milos	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	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	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	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	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
105	Thira	95	69	138	80	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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

Επιπλέον, βάσει των στοιχείων της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής¹ (Ελ.Στατ.) για τους αποβιβασθέντες σε κάθε λιμάνι, δημιουργήθηκε ο πίνακας της ζήτησης από και προς το Λαύριο. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι αποβιβασθέντες για την περίοδο Οκτώβριος 2016-Σεπτέμβριος 2017, ήτοι για χρονική περίοδο 12 μηνών.

Πίνακας 4.3: Αποβιβασθέντες περιόδου Οκτώβριος 2016-Σεπτέμβριος 2017

α/α	Λιμάνι	Ζήτηση	Ποσοστό %
1	Ρέθυμνο	62284	0.68%
2	Ηράκλειο	943544	10.36%
3	Κύθηρα-Διακοφτί	22135	0.24%
4	Μήλος	248509	2.73%
5	Θήρα	1114252	12.23%
6	Πάρος	1188953	13.05%
7	Νάξος	666849	7.32%
8	Σύρος	377153	4.14%
9	Μύκονος	860923	9.45%
10	Τήνος	644737	7.08%
11	Άνδρος-Γαύριο	344467	3.78%
12	Χίος	222291	2.44%
13	Ικαρία	125517	1.38%
14	Σάμος	126695	1.39%
15	Αστυπάλαια	37311	0.41%
16	Κάρπαθος	27887	0.31%
17	Ρόδος	360090	3.95%
18	Κως	296670	3.26%
19	Κάλυμνος	189076	2.08%
20	Σκύρος	100067	1.10%
21	Μυτιλήνη	232888	2.56%
22	Λήμνος	141461	1.55%
23	Αμοργός	94811	1.04%
24	Σίφνος	174169	1.91%
25	Σέριφος	100800	1.11%
26	Κύθνος	110720	1.22%
27	Λέρος	78756	0.86%
28	Ίος	205185	2.25%
29	Καστελόριζο	12260	0.13%
	Σύνολο	9,110,460	100.00%

¹ <http://www.statistics.gr/>

4.2 Δεδομένα εφαρμογής

Για την εφαρμογή του αλγορίθμου απαιτείται ο προσδιορισμός της χωρητικότητας αλλά και της ταχύτητας κίνησης, τόσο του μεγάλου πλοίου όσο και του μικρού. Έτσι επιλέχθηκε το πλοίο που θα εξυπηρετεί τη διαδρομή μεταξύ των Hubs να είναι χωρητικότητας 1600 επιβατών με μέση ταχύτητα τους 25 κόμβους και τα πλοία που θα εξυπηρετούν τα Spokes να είναι χωρητικότητας 150 επιβατών με μέση ταχύτητα 33 κόμβων. Επιπλέον επιλέχθηκε χρόνος εξυπηρέτησης σε κάθε λιμάνι ίσος με 20 λεπτά.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η ζήτηση που επιλέχθηκε για τις ανάγκες εφαρμογής του αλγορίθμου βάσει των αποβιβασθέντων σε κάθε λιμάνι.

Πίνακας 4.4: Ζήτηση από/προς Λαύριο

α/α	Λιμάνι	Άπο Λαύριο	Προς Λαύριο
1	Ρέθυμνο	24	23
2	Ηράκλειο	90	89
3	Κύθηρα-Διακοφτί	16	15
4	Μήλος	40	40
5	Θήρα	100	98
6	Πάρος	110	108
7	Νάξος	65	65
8	Σύρος	53	52
9	Μύκονος	74	74
10	Τήνος	56	55
11	Άνδρος-Γαύριο	49	48
12	Χίος	31	30
13	Ικαρία	24	23
14	Σάμος	24	24
15	Αστυπάλαια	19	18
16	Κάρπαθος	17	17
17	Ρόδος	51	51
18	Κως	48	47
19	Κάλυμνος	29	28
20	Σκύρος	20	20
21	Μυτιλήνη	38	37
22	Λήμνος	25	24
23	Αμοργός	25	24
24	Σίφνος	28	27
25	Σέριφος	24	24
26	Κύθνος	23	22
27	Λέρος	23	21
28	Ίος	30	30
29	Καστελόριζο	15	15

4.2.1 Παράμετροι του γενετικού αλγορίθμου

Πραγματοποιούνται δοκιμές με μέγεθος πληθυσμού-Population Size ίσο με 25, 50, 75, συντελεστή διασταύρωσης-Crossover Rate 0.2, 0.4 και 0.6 και συντελεστή μετάλλαξης-Mutation Rate 0.05, 0.1 και 0.15. Ο αλγόριθμος εκτελείται συνολικά 135 φορές για κάθε hub, 5 φορές για κάθε πιθανό συνδυασμό αυτών των παραμέτρων. Συνολικά εκτελέστηκαν 810 επαναλήψεις.

4.3 Εφαρμογή-Αποτελέσματα για περίπτωση δύο(2) Hub

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μεθοδολογικού πλαισίου για την περίπτωση επιλογής δύο(2) Hub από τα είκοσι-εννέα (29) λιμάνια της περιοχής μελέτης.

4.3.1 Αποτελέσματα Hub Location-Allocation για πλήθος Hub=2

Στη μεθοδολογία που προτάθηκε για την επίλυση του προβλήματος είναι απαραίτητος ο καθορισμός του πλήθους των Hub από την πλευρά του χρήστη. Στην πρώτη περίπτωση επιλέχθηκε η εύρεση δύο (2) Hub και η κατανομή των υπόλοιπων λιμανιών σε αυτά.

Καθ' αυτό τον τρόπο επιλέχθηκαν το λιμάνι της Ίου και το λιμάνι της Καλύμνου με δεκαεπτά (17) και δέκα (10) spokes αντίστοιχα. Αναλυτικά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα Hub Location-Allocation (p=2)

Hub	Spokes
1 Ίος	Ρέθυμνο
	Ηράκλειο
	Κύθηρα-Διακοφτί
	Μήλος
	Θήρα
	Πάρος
	Νάξος
	Σύρος
	Μύκονος
	Τήνος
	Άνδρος-Γαύριο
	Σκύρος
	Μυτιλήνη
	Λήμνος
	Σίφνος
	Σέριφος
	Κύθνος

Hub	Spokes
2 Κάλυμνος	Χίος
	Ικαρία
	Σάμος
	Αστυπάλαια
	Κάρπαθος
	Ρόδος
	Κως
	Αμοργός
	Λέρος
	Καστελόριζο

4.3.2 Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου

Για την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες επαναλήψεις για κάθε hub. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 270 επαναλήψεις και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες για κάθε hub ξεχωριστά. Αξίζει να σημειωθεί πως ο αλγόριθμος εκτελέστηκε σε επεξεργαστή 3,8GHz με μνήμη RAM 8GB.

Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου – Hub Τος

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
25	0.2	0.05	55.913	56.107	0.269
			56.186		
			56.519		
			56.186		
			55.731		
25	0.2	0.1	55.762	55.913	0.202
			56.216		
			55.762		
			56.095		
			55.731		
25	0.2	0.15	55.762	55.847	0.170
			55.762		
			55.762		
			55.762		
			56.186		
25	0.4	0.05	55.731	55.725	0.059
			55.762		
			55.61		
			55.762		
			55.762		
25	0.4	0.1	55.61	55.725	0.059
			55.762		
			55.731		
			55.762		
			55.762		
25	0.4	0.15	56.458	56.071	0.321
			55.913		
			55.762		
			55.762		
			56.458		
25	0.6	0.05	55.762	55.749	0.097
			55.731		
			55.61		
			55.913		
			55.731		

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
25	0.6	0.15	<u>56.095</u>	56.131	0.344
			<u>56.428</u>		
			<u>55.762</u>		
			<u>56.61</u>		
			<u>55.762</u>		
50	0.2	0.05	<u>55.731</u>	55.756	0.012
			<u>55.762</u>		
			<u>55.762</u>		
			<u>55.762</u>		
			<u>55.762</u>		
50	0.2	0.1	<u>55.762</u>	55.695	0.070
			<u>55.61</u>		
			<u>55.762</u>		
			<u>55.61</u>		
			<u>55.731</u>		
50	0.2	0.15	<u>55.762</u>	55.822	0.219
			<u>55.731</u>		
			<u>55.61</u>		
			<u>56.246</u>		
			<u>55.762</u>		
50	0.4	0.05	<u>55.762</u>	55.865	0.174
			<u>55.913</u>		
			<u>55.731</u>		
			<u>56.186</u>		
			<u>55.731</u>		
50	0.4	0.1	<u>55.762</u>	55.756	0.012
			<u>55.762</u>		
			<u>55.731</u>		
			<u>55.762</u>		
			<u>55.762</u>		
50	0.4	0.15	<u>55.762</u>	55.695	0.070
			<u>55.61</u>		
			<u>55.762</u>		
			<u>55.61</u>		
			<u>55.731</u>		
50	0.6	0.05	<u>55.762</u>	55.719	0.056
			<u>55.731</u>		
			<u>55.610</u>		
			<u>55.731</u>		
			<u>55.762</u>		

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
50	0.6	0.1	<u>55.762</u>	55.847	0.170
			<u>55.762</u>		
			<u>55.762</u>		
			<u>55.762</u>		
			<u>56.186</u>		
50	0.6	0.15	<u>55.913</u>	55.762	0.096
			<u>55.762</u>		
			<u>55.762</u>		
			<u>55.61</u>		
			<u>55.762</u>		
75	0.2	0.05	<u>55.61</u>	55.719	0.056
			<u>55.731</u>		
			<u>55.762</u>		
			<u>55.731</u>		
			<u>55.762</u>		
75	0.2	0.1	<u>55.731</u>	55.743	0.015
			<u>55.731</u>		
			<u>55.731</u>		
			<u>55.762</u>		
			<u>55.762</u>		
75	0.2	0.15	<u>55.762</u>	55.756	0.012
			<u>55.762</u>		
			<u>55.762</u>		
			<u>55.762</u>		
			<u>55.731</u>		
75	0.4	0.05	<u>55.762</u>	55.841	0.173
			<u>55.762</u>		
			<u>55.731</u>		
			<u>56.186</u>		
			<u>55.762</u>		
75	0.4	0.1	<u>55.731</u>	55.828	0.179
			<u>56.186</u>		
			<u>55.762</u>		
			<u>55.731</u>		
			<u>55.731</u>		
75	0.4	0.15	<u>55.731</u>	55.750	0.015
			<u>55.762</u>		
			<u>55.762</u>		
			<u>55.762</u>		
			<u>55.731</u>		

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
75	0.6	0.05	55.762	55.932	0.208
			55.762		
			55.762		
			56.186		
			56.186		
75	0.6	0.1	55.61	55.689	0.065
			55.61		
			55.731		
			55.762		
			55.731		
75	0.6	0.15	55.762	55.756	0.012
			55.762		
			55.762		
			55.731		
			55.762		

Βάσει των παραπάνω προκύπτει πως ο συνδυασμός που δίνει κατά μέσο όρο τις καλύτερες τιμές είναι: πληθυσμός 50, συντελεστής διασταύρωσης 0.2 και συντελεστής μετάλλαξης 0.1. Οι διαφορετικοί συνδυασμοί των παραμέτρων δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα, με συναρτήσεις ικανότητας που διαφέρουν, ενώ ο αριθμός των διαδρομών δε διαφέρει σημαντικά.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το Hub της Καλύμνου.

Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου – Hub Κάλυμνος

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
25	0.2	0.05	<u>27.391</u>	27.391	0.000
			<u>27.391</u>		
			<u>27.391</u>		
			<u>27.391</u>		
			<u>27.391</u>		
25	0.2	0.1	<u>28.027</u>	27.518	0.254
			<u>27.391</u>		
			<u>27.391</u>		
			<u>27.391</u>		
			<u>27.391</u>		
25	0.2	0.15	<u>27.391</u>	27.391	0.000
			<u>27.391</u>		
			<u>27.391</u>		
			<u>27.391</u>		
			<u>27.391</u>		
25	0.4	0.05	<u>28.027</u>	27.645	0.312
			<u>27.391</u>		
			<u>28.027</u>		
			<u>27.391</u>		
			<u>27.391</u>		
25	0.4	0.1	<u>27.391</u>	27.391	0.000
			<u>27.391</u>		
			<u>27.391</u>		
			<u>27.391</u>		
			<u>27.391</u>		
25	0.4	0.15	<u>27.391</u>	27.736	0.447
			<u>28.482</u>		
			<u>28.027</u>		
			<u>27.391</u>		
			<u>27.391</u>		
25	0.6	0.05	<u>27.391</u>	27.518	0.254
			<u>27.391</u>		
			<u>27.391</u>		
			<u>27.391</u>		
			<u>28.027</u>		
25	0.6	0.1	<u>27.391</u>	27.864	0.420
			<u>28.482</u>		
			<u>28.027</u>		
			<u>28.027</u>		
			<u>27.391</u>		

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
25	0.6	0.15	27.391	27.736	0.447
			28.482		
			27.391		
			28.027		
			27.391		
50	0.2	0.05	27.391	27.518	0.254
			27.391		
			27.391		
			27.391		
			28.027		
50	0.2	0.1	27.391	27.645	0.312
			27.391		
			28.027		
			27.391		
			28.027		
50	0.2	0.15	27.391	27.518	0.254
			27.391		
			27.391		
			27.391		
			28.027		
50	0.4	0.05	27.391	27.391	0.000
			27.391		
			27.391		
			27.391		
			27.391		
50	0.4	0.1	27.391	27.391	0.000
			27.391		
			27.391		
			27.391		
			27.391		
50	0.4	0.15	27.391	27.391	0.000
			27.391		
			27.391		
			27.391		
			27.391		
50	0.6	0.05	27.391	27.645	0.312
			27.391		
			27.391		
			28.027		
			28.027		

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
50	0.6	0.1	27.391	27.391	0.000
			27.391		
			27.391		
			27.391		
			27.391		
50	0.6	0.15	28.027	27.518	0.254
			27.391		
			27.391		
			27.391		
			27.391		
75	0.2	0.05	27.391	27.518	0.254
			27.391		
			27.391		
			27.391		
			28.027		
75	0.2	0.1	28.058	27.524	0.267
			27.391		
			27.391		
			27.391		
			27.391		
75	0.2	0.15	27.391	27.391	0.000
			27.391		
			27.391		
			27.391		
			27.391		
75	0.4	0.05	27.391	27.391	0.000
			27.391		
			27.391		
			27.391		
			27.391		
75	0.4	0.1	27.391	27.488	0.194
			27.876		
			27.391		
			27.391		
			27.391		
75	0.4	0.15	27.391	27.391	0.000
			27.391		
			27.391		
			27.391		
			27.391		

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
75	0.6	0.05	28.027	27.518	0.254
			<u>27.391</u>		
			27.391		
			<u>27.391</u>		
			27.391		
75	0.6	0.1	27.391	27.391	0.000
			<u>27.391</u>		
			27.391		
			<u>27.391</u>		
			27.391		
75	0.6	0.15	28.027	27.518	0.254
			<u>27.391</u>		
			27.391		
			<u>27.391</u>		
			27.391		

Βάσει των παραπάνω προκύπτει πως οι συνδυασμοί που δίνουν κατά μέσο όρο τις καλύτερες τιμές ποικίλλουν. Γεγονός που συμβαίνει καθώς το εν λόγω δίκτυο αποτελείται από λιγότερα λιμάνια σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, επομένως επιτυγχάνεται η εύρεση της βέλτιστης λύσης με διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων.

Οι τελικές διαδρομές που προέκυψαν για την περίπτωση των δύο Hubs παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Συνολικά απαιτούνται οχτώ (8) διαδρομές για την εξυπηρέτηση όλων των λιμανιών.

Πίνακας 4.8: Διαδρομές Hub to Spokes για δύο Hub

<u>Hub</u>	<u>Route</u>	<u>Spokes</u>	<u>Obj. Function</u>
Κάλυμνος	1	Κως	27.391
		Ρόδος	
		Καστελόριζο	
		Κάρπαθος	
		Αστυπάλαια	
	2	Λέρος	
		Αμοργός	
		Ικαρία	
		Χίος	
		Σάμος	
Ίος	3	Σύρος	55.610
		Άνδρος-Γαύριο	
		Σέριφος	
	4	Κύθνος	
		Μύκονος	
	5	Νάξος	
		Μήλος	
	6	Πάρος	
		Σίφνος	
	7	Θήρα	
		Τήνος	
		Μυτιλήνη	
		Λήμνος	
		Σκύρος	
		8	
	Ρέθυμνο		
Κύθηρα-Διακοφτί			

4.3.3 Αποτελέσματα Hub-to-Hub Routing

Για να ολοκληρωθεί το ακτοπλοϊκό δίκτυο που μελετάται, απαιτείται η εύρεση της διαδρομής του μεγάλου πλοίου με αφετηρία το λιμάνι του Λαυρίου. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η εύρεση της διαδρομής αυτής πραγματοποιείται με δύο τρόπους. Αρχικά με τη λύση του προβλήματος του Πλανόδιου Πωλητή (ΠΠΠ) - Traveling Salesman Problem (TSP) ελαχιστοποιώντας τη διανυθείσα απόσταση και κατά δεύτερον εξυπηρετώντας πρώτα τα λιμάνια με τη μεγαλύτερη συνολική ζήτηση.

Στην περίπτωση των δύο Hubs, οι λύσεις που προκύπτουν είναι ίδιες και στις δύο περιπτώσεις. Συγκεκριμένα είναι η εξής:

Λαύριο → Ίος → Κάλυμνος → Λαύριο

Διανύοντας συνολικά 339 ναυτικά μίλια.

4.3.4 Συνολικά αποτελέσματα δικτύου

Συνδυάζοντας τελικά τα τρία στάδια επίλυσης του προβλήματος, προκύπτει το συνολικό Hub&Spoke δίκτυο για την περιοχή μελέτης, όπου η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι 96,561. Το εν λόγω δίκτυο παρουσιάζεται στον παρακάτω χάρτη.



Χάρτης 4.2: Δρομολόγηση πλοίων – Περίπτωση δύο Hub

4.4 Εφαρμογή-Αποτελέσματα για περίπτωση τριών (3) Hub

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μεθοδολογικού πλαισίου για την περίπτωση επιλογής τριών (3) Hub από τα είκοσι-εννέα (29) λιμάνια της περιοχής μελέτης.

4.4.1 Αποτελέσματα Hub Location-Allocation για πλήθος Hub=3

Στη μεθοδολογία που προτάθηκε για την επίλυση του προβλήματος είναι απαραίτητος ο καθορισμός του πλήθους των Hub από την πλευρά του χρήστη. Στην δεύτερη περίπτωση επιλέχθηκε η εύρεση τριών (3) Hub και η κατανομή των υπόλοιπων λιμανιών σε αυτά.

Καθ' αυτό τον τρόπο επιλέχθηκαν το λιμάνι της Τήνου, το λιμάνι της Καλύμνου και το λιμάνι της Σερίφου με οχτώ (8), εννέα (9) και εννέα (9) spokes αντίστοιχα. Αναλυτικά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα Hub Location-Allocation (p=3)

Hub	Spokes	Hub	Spokes	Hub	Spokes
1 Τήνος	Άνδρος-Γαύριο	2 Κάλυμνος	Αστυπάλαια	3 Σέριφος	Ηράκλειο
	Σύρος		Κάρπαθος		Ρέθυμνο
	Νάξος		Καστελόριζο		Κύθηρα-Διακοφτί
	Μύκονος		Ρόδος		Πάρος
	Χίος		Κως		Ίος
	Μυτιλήνη		Λέρος		Μήλος
	Λήμνος		Αμοργός		Σίφνος
	Σκύρος		Ικαρία		Θήρα
			Σάμος		Κύθνος

4.4.2 Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου

Για την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες επαναλήψεις για κάθε hub. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 405 επαναλήψεις και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες για κάθε hub ξεχωριστά. Αξίζει να σημειωθεί πως ο αλγόριθμος εκτελέστηκε όπως και προηγουμένως σε επεξεργαστή 3,8GHz με μνήμη RAM 8GB.

Πίνακας 4.10: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου – Hub Τήνος

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
25	0.2	0.05	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		
25	0.2	0.1	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		
25	0.2	0.15	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		
25	0.4	0.05	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		
25	0.4	0.1	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		
25	0.4	0.15	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		
25	0.6	0.05	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		
25	0.6	0.1	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
25	0.6	0.15	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		
50	0.2	0.05	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		
50	0.2	0.1	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		
50	0.2	0.15	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		
50	0.4	0.05	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		
50	0.4	0.1	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		
50	0.4	0.15	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		
50	0.6	0.05	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
50	0.6	0.1	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		
50	0.6	0.15	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		
75	0.2	0.05	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		
75	0.2	0.1	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		
75	0.2	0.15	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		
75	0.4	0.05	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		
75	0.4	0.1	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		
75	0.4	0.15	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
75	0.6	0.05	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		
75	0.6	0.1	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		
75	0.6	0.15	22.913	22.913	0
			22.913		
			22.913		
			22.913		
			22.913		

Λόγω του ότι πρόκειται για μικρό δίκτυο, οποιοσδήποτε συνδυασμός και αν χρησιμοποιηθεί συγκλίνει στη βέλτιστη λύση.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το Hub της Καλύμνου.

Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου – Hub Κάλυμνος

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
25	0.2	0.05	24.364	24.491	0.254
			25		
			24.364		
			24.364		
			24.364		
25	0.2	0.1	24.364	24.958	0.312
			25		
			25.212		
			25.212		
			25		
25	0.2	0.15	25	24.879	0.444
			25.212		
			25.455		
			24.364		
			24.364		

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
25	0.4	0.05	25	24.879	0.444
			<u>24.364</u>		
			<u>25.212</u>		
			<u>24.364</u>		
			25.455		
25	0.4	0.1	<u>24.364</u>	24.491	0.254
			25		
			<u>24.364</u>		
			<u>24.364</u>		
			<u>24.364</u>		
25	0.4	0.15	<u>24.364</u>	24.746	0.312
			25		
			<u>24.364</u>		
			25		
			25		
25	0.6	0.05	<u>24.364</u>	24.618	0.312
			<u>24.364</u>		
			<u>24.364</u>		
			25		
			25		
25	0.6	0.1	<u>25.212</u>	24.788	0.355
			<u>24.364</u>		
			25		
			<u>24.364</u>		
			25		
25	0.6	0.15	<u>24.364</u>	24.752	0.481
			<u>24.364</u>		
			<u>24.364</u>		
			25.455		
			<u>25.212</u>		
50	0.2	0.05	<u>24.364</u>	24.491	0.254
			25		
			<u>24.364</u>		
			<u>24.364</u>		
			<u>24.364</u>		
50	0.2	0.1	25	24.491	0.254
			<u>24.364</u>		
			<u>24.364</u>		
			<u>24.364</u>		
			<u>24.364</u>		

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
50	0.2	0.15	25	24.746	0.312
			<u>25</u>		
			<u>25</u>		
			<u>24.364</u>		
			24.364		
50	0.4	0.05	25	24.491	0.254
			<u>24.364</u>		
			<u>24.364</u>		
			<u>24.364</u>		
			24.364		
50	0.4	0.1	25	24.491	0.254
			<u>24.364</u>		
			<u>24.364</u>		
			<u>24.364</u>		
			24.364		
50	0.4	0.15	25	24.618	0.312
			<u>24.364</u>		
			<u>24.364</u>		
			25		
			24.364		
50	0.6	0.05	25	24.618	0.312
			<u>24.364</u>		
			<u>24.364</u>		
			25		
			24.364		
50	0.6	0.1	24.364	24.491	0.254
			<u>24.364</u>		
			<u>24.364</u>		
			25		
			24.364		
50	0.6	0.15	24.364	24.746	0.312
			<u>25</u>		
			<u>25</u>		
			<u>24.364</u>		
			24.364		
75	0.2	0.05	24.364	24.491	0.254
			<u>24.364</u>		
			<u>24.364</u>		
			25		
			24.364		

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
75	0.2	0.1	<u>24.364</u> <u>24.364</u> 25 <u>25</u> 24.364	24.618	0.312
75	0.2	0.15	<u>24.364</u> <u>24.364</u> <u>24.364</u> 25 <u>24.364</u>	24.491	0.254
75	0.4	0.05	<u>24.364</u> <u>24.364</u> <u>24.364</u> <u>25.212</u> 24.364	24.534	0.339
75	0.4	0.1	<u>24.364</u> <u>24.364</u> <u>24.364</u> 25 <u>24.364</u>	24.491	0.254
75	0.4	0.15	<u>24.364</u> <u>24.364</u> <u>24.364</u> <u>24.364</u> 24.364	24.364	0.000
75	0.6	0.05	<u>24.364</u> <u>24.364</u> <u>25</u> <u>25</u> 25	24.746	0.312
75	0.6	0.1	<u>24.364</u> <u>24.364</u> <u>24.364</u> <u>24.364</u> 24.364	24.364	0.000
75	0.6	0.15	<u>24.364</u> <u>24.364</u> <u>24.364</u> 25 <u>25</u>	24.618	0.312

Βάσει των παραπάνω προκύπτει πως ο συνδυασμός που δίνει κατά μέσο όρο τις καλύτερες τιμές είναι: πληθυσμός 75, συντελεστής διασταύρωσης 0.4 και συντελεστής μετάλλαξης 0.15. Οι διαφορετικοί συνδυασμοί των παραμέτρων δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα, με συναρτήσεις ικανότητας που διαφέρουν, ενώ ο αριθμός των διαδρομών δε διαφέρει σημαντικά.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το Hub της Σερίφου.

Πίνακας 4.12: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου – Hub Σέριφος

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
25	0.2	0.05	27.212	27.212	0
			27.212		
			27.212		
			27.212		
			27.212		
25	0.2	0.1	27.212	27.212	0
			27.212		
			27.212		
			27.212		
			27.212		
25	0.2	0.15	27.212	27.212	0
			27.212		
			27.212		
			27.212		
			27.212		
25	0.4	0.05	27.212	27.212	0
			27.212		
			27.212		
			27.212		
			27.212		
25	0.4	0.1	27.212	27.212	0
			27.212		
			27.212		
			27.212		
			27.212		
25	0.4	0.15	27.212	27.212	0
			27.212		
			27.212		
			27.212		
			27.212		

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
25	0.6	0.05	<u>27.212</u>	27.212	0
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
25	0.6	0.1	<u>27.212</u>	27.212	0
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
25	0.6	0.15	<u>27.212</u>	27.212	0
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
50	0.2	0.05	<u>27.212</u>	27.212	0
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
50	0.2	0.1	<u>27.212</u>	27.212	0
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
50	0.2	0.15	<u>27.212</u>	27.212	0
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
50	0.4	0.05	<u>27.212</u>	27.212	0
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
50	0.4	0.1	<u>27.212</u>	27.212	0
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
50	0.4	0.15	<u>27.212</u>	27.212	0
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
50	0.6	0.05	<u>27.212</u>	27.212	0
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
50	0.6	0.1	<u>27.212</u>	27.212	0
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
50	0.6	0.15	<u>27.212</u>	27.212	0
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
75	0.2	0.05	<u>27.212</u>	27.212	0
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
75	0.2	0.1	<u>27.212</u>	27.212	0
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
75	0.2	0.15	<u>27.212</u>	27.212	0
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
75	0.4	0.05	<u>27.212</u>	27.212	0
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
75	0.4	0.1	<u>27.212</u>	27.212	0
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
75	0.4	0.15	<u>27.212</u>	27.212	0
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
75	0.6	0.05	<u>27.212</u>	27.212	0
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
75	0.6	0.1	<u>27.212</u>	27.212	0
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
75	0.6	0.15	<u>27.212</u>	27.212	0
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		
			<u>27.212</u>		

Λόγω του ότι πρόκειται για μικρό δίκτυο, οποιοσδήποτε συνδυασμός και αν χρησιμοποιηθεί συγκλίνει στη βέλτιστη λύση.

Οι τελικές διαδρομές που προέκυψαν για την περίπτωση των τριών Hubs παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Συνολικά απαιτούνται εννέα (9) διαδρομές για την εξυπηρέτηση όλων των λιμανιών.

Πίνακας 4.13: Διαδρομές Hub to Spokes για τρία Hub

<u>Hub</u>	<u>Route</u>	<u>Spokes</u>	<u>Obj. Function</u>
Τήνος	1	Άνδρος-Γαύριο	22.913
		Σύρος	
	2	Νάξος	
		Μύκονος	
	3	Χίος	
		Μυτιλήνη	
Λήμνος			
Κάλυμνος	4	Αστυπάλαια	24.364
		Κάρπαθος	
		Καστελόριζο	
		Ρόδος	
	5	Κως	
		Λέρος	
Σέριφος	6	Αμοργός	27.212
		Ικαρία	
	Σάμος		
7	Ηράκλειο		
	Ρέθυμνο		
8	Κύθηρα-Διακοφτί		
	Πάρος		
	Ίος		
9	Μήλος		
	Σίφνος		
		Θήρα	
		Κύθνος	

4.4.3 Αποτελέσματα Hub-to-Hub Routing

Για να ολοκληρωθεί το ακτοπλοϊκό δίκτυο που μελετάται, απαιτείται η εύρεση της διαδρομής του μεγάλου πλοίου με αφετηρία το λιμάνι του Λαυρίου. Όπως και προηγουμένως, η εύρεση της διαδρομής αυτής πραγματοποιείται με δύο τρόπους.

Αρχικά με τη λύση του προβλήματος του Πλανόδιου Πωλητή (ΠΠΠ) - Traveling Salesman Problem (TSP) όπου η διαδρομή που προέκυψε ελαχιστοποιώντας τη διανυθείσα απόσταση είναι η εξής:

- Λαύριο→Τήνος→Κάλυμνος→Σέριφος→Λαύριο διανύοντας συνολικά 347 ναυτικά μίλια.

Εξυπηρετώντας αρχικά τα λιμάνια με τη μεγαλύτερη ζήτηση προέκυψε η εξής διαδρομή.

- Λαύριο→Σέριφος→Τήνος→Κάλυμνος→Λαύριο διανύοντας συνολικά 364 ναυτικά μίλια.

Λόγω της μικρής διαφοράς της διανυθείσας απόστασης προτιμάται η δεύτερη κατά σειρά επιλογή καθώς επιτυγχάνεται ταυτόχρονα και η ταχύτερη εξυπηρέτηση της μεγαλύτερης ζήτησης.

4.4.4 Συνολικά αποτελέσματα δικτύου

Συνδυάζοντας τελικά τα τρία στάδια επίλυσης του προβλήματος, προκύπτει το συνολικό Hub&Spoke δίκτυο για την περιοχή μελέτης, όπου η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι 89,049. Το εν λόγω δίκτυο παρουσιάζεται στον παρακάτω χάρτη.



Χάρτης 4.3: Δρομολόγηση πλοίων – Περίπτωση τριών Hub

4.5 Εφαρμογή-Αποτελέσματα για περίπτωση τεσσάρων (4) Hub

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μεθοδολογικού πλαισίου για την περίπτωση τεσσάρων (4) Hub από τα είκοσι-εννέα λιμάνια (29) της περιοχής μελέτης.

4.5.1 Αποτελέσματα Hub Location-Allocation για πλήθος Hub=4

Στη μεθοδολογία που προτάθηκε για την επίλυση του προβλήματος είναι απαραίτητος ο καθορισμός του πλήθους των Hub από την πλευρά του χρήστη. Στην Τρίτη περίπτωση επιλέχθηκε η εύρεση τεσσάρων (4) Hub και η κατανομή των υπόλοιπων λιμανιών σε αυτά.

Καθ' αυτό τον τρόπο επιλέχθηκαν το λιμάνι της Τήνου, το λιμάνι της Ρόδου, το λιμάνι της Κω και το λιμάνι της Σερίφου με δέκα (10), δύο (2), τέσσερα (4) και εννέα (9) spokes αντίστοιχα. Αναλυτικά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.14: Αποτελέσματα Hub Location-Allocation (p=4)

Hub	Spokes
1 Τήνος	Άνδρος-Γαύριο
	Σύρος
	Νάξος
	Μύκονος
	Χίος
	Μυτιλήνη
	Λήμνος
	Σκύρος
	Ικαρία
	Αμοργός
2 Σέριφος	Ηράκλειο
	Ρέθυμνο
	Κύθηρα-Διακοφτί
	Πάρος
	Ίος
	Μήλος
	Σίφνος
	Θήρα
	Κύθνος
3 Ρόδος	Κάρπαθος
	Καστελόριζο
4 Κως	Αστυπάλαια
	Κάλυμνος
	Λέρος
	Σάμος

4.5.2 Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου

Για την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες επαναλήψεις για κάθε hub. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 270 επαναλήψεις και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες για κάθε hub ξεχωριστά.

Αξίζει να σημειωθεί πως ο αλγόριθμος εκτελέστηκε όπως και προηγουμένως σε επεξεργαστή 3,8GHz με μνήμη RAM 8GB.

Πίνακας 4.15: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου – Hub Τήνος

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
25	0.2	0.05	29.118	27.882	0.618
			27.573		
			27.573		
			27.573		
			27.573		
25	0.2	0.1	27.573	27.573	0
			27.573		
			27.573		
			27.573		
			27.573		
25	0.2	0.15	27.573	27.7426	0.3392
			27.573		
			27.573		
			27.573		
			28.421		
25	0.4	0.05	27.573	27.573	0
			27.573		
			27.573		
			27.573		
			27.573		
25	0.4	0.1	28.633	27.785	0.424
			27.573		
			27.573		
			27.573		
			27.573		
25	0.4	0.15	28.633	27.785	0.424
			27.573		
			27.573		
			27.573		
			27.573		
25	0.6	0.05	27.573	27.7426	0.3392
			27.573		
			27.573		
			27.573		
			28.421		
25	0.6	0.1	27.573	27.573	0
			27.573		
			27.573		
			27.573		
			27.573		

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
25	0.6	0.15	28.421	27.7426	0.3392
			<u>27.573</u>		
			27.573		
			<u>27.573</u>		
			27.573		
50	0.2	0.05	<u>27.573</u>	27.882	0.618
			<u>27.573</u>		
			29.118		
			<u>27.573</u>		
			27.573		
50	0.2	0.1	<u>27.573</u>	27.573	0
			<u>27.573</u>		
			27.573		
			<u>27.573</u>		
			27.573		
50	0.2	0.15	<u>27.573</u>	27.573	0
			<u>27.573</u>		
			27.573		
			<u>27.573</u>		
			27.573		
50	0.4	0.05	<u>27.573</u>	27.785	0.424
			<u>27.573</u>		
			27.573		
			<u>27.573</u>		
			28.633		
50	0.4	0.1	<u>27.573</u>	27.573	0
			<u>27.573</u>		
			27.573		
			<u>27.573</u>		
			27.573		
50	0.4	0.15	<u>27.573</u>	27.573	0
			<u>27.573</u>		
			27.573		
			<u>27.573</u>		
			27.573		
50	0.6	0.05	<u>27.573</u>	27.573	0
			<u>27.573</u>		
			27.573		
			<u>27.573</u>		
			27.573		

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
50	0.6	0.1	<u>27.573</u>	27.573	0
			<u>27.573</u>		
			<u>27.573</u>		
			<u>27.573</u>		
			<u>27.573</u>		
50	0.6	0.15	<u>27.573</u>	27.573	0
			<u>27.573</u>		
			<u>27.573</u>		
			<u>27.573</u>		
			<u>27.573</u>		
75	0.2	0.05	<u>27.573</u>	27.573	0
			<u>27.573</u>		
			<u>27.573</u>		
			<u>27.573</u>		
			<u>27.573</u>		
75	0.2	0.1	<u>27.573</u>	27.7426	0.3392
			<u>27.573</u>		
			<u>28.421</u>		
			<u>27.573</u>		
			<u>27.573</u>		
75	0.2	0.15	<u>27.573</u>	27.573	0
			<u>27.573</u>		
			<u>27.573</u>		
			<u>27.573</u>		
			<u>27.573</u>		
75	0.4	0.05	<u>27.573</u>	27.573	0
			<u>27.573</u>		
			<u>27.573</u>		
			<u>27.573</u>		
			<u>27.573</u>		
75	0.4	0.1	<u>27.573</u>	27.573	0
			<u>27.573</u>		
			<u>27.573</u>		
			<u>27.573</u>		
			<u>27.573</u>		
75	0.4	0.15	<u>27.573</u>	27.573	0
			<u>27.573</u>		
			<u>27.573</u>		
			<u>27.573</u>		
			<u>27.573</u>		

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
75	0.6	0.05	27.573	27.573	0
			27.573		
			27.573		
			27.573		
			27.573		
75	0.6	0.1	27.573	27.7426	0.3392
			27.573		
			28.421		
			27.573		
			27.573		
75	0.6	0.15	27.573	27.785	0.424
			27.573		
			27.573		
			28.633		
			27.573		

Βάσει των παραπάνω προκύπτει πως οι συνδυασμοί που δίνουν κατά μέσο όρο τις καλύτερες τιμές ποικίλλουν. Γεγονός που συμβαίνει καθώς το εν λόγω δίκτυο αποτελείται από λίγα σχετικά, επομένως επιτυγχάνεται η εύρεση της βέλτιστης λύσης με διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το Hub της Κω.

Πίνακας 4.16: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου – Hub Κω

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
25	0.2	0.05	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		
25	0.2	0.1	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		
25	0.2	0.15	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
25	0.4	0.05	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		
25	0.4	0.1	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		
25	0.4	0.15	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		
25	0.6	0.05	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		
25	0.6	0.1	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		
25	0.6	0.15	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		
50	0.2	0.05	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		
50	0.2	0.1	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
50	0.2	0.15	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		
50	0.4	0.05	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		
50	0.4	0.1	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		
50	0.4	0.15	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		
50	0.6	0.05	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		
50	0.6	0.1	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		
50	0.6	0.15	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		
75	0.2	0.05	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		

Population	Crossover	Mutation	Fitness	Average Fitness	Standard Deviation
75	0.2	0.1	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		
75	0.2	0.15	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		
75	0.4	0.05	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		
75	0.4	0.1	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		
75	0.4	0.15	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		
75	0.6	0.05	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		
75	0.6	0.1	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		
75	0.6	0.15	9.381	9.381	0
			9.381		
			9.381		
			9.381		
			9.381		

Λόγω του ότι πρόκειται για μικρό δίκτυο, οποιοσδήποτε συνδυασμός και αν χρησιμοποιηθεί συγκλίνει στη βέλτιστη λύση.

Επιπρόσθετα το hub της Σερίφου πρόεκυψε ίδιο με της περίπτωσης των τριών (3) Hubs, επομένως οι διαδρομές είναι ίδιες. Τέλος το Hub της Ρόδου είχε μόλις δύο (2) spokes να εξυπηρετήσει και επομένως δε χρειάστηκε η χρήση του αλγορίθμου.

Οι τελικές διαδρομές που προέκυψαν για την περίπτωση των τεσσάρων Hubs παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Συνολικά απαιτούνται εννέα (9) διαδρομές για την εξυπηρέτηση όλων των λιμανιών.

Πίνακας 4.17: Διαδρομές Hub to Spokes για τέσσερα Hub

<u>Hub</u>	<u>Route</u>	<u>Spokes</u>	<u>Obj. Function</u>
Τήνος	1	Σύρος	27.573
		Μύκονος	
	2	Νάξος	
		Άνδρος-Γαύριο	
		Αμοργός	
	3	Ικαρία	
		Χίος	
		Μυτιλήνη	
		Λήμνος	
Σκύρος			
Ρόδος	4	Καστελόριζο Κάρπαθος	10.842
Κως	5	Σάμος	9.381
		Λέρος	
		Αστυπάλαια	
Σέριφος	6	Ηράκλειο	27.212
		Ρέθυμνο	
		Κύθηρα-Διακοφτί	
	7	Πάρος	
		Ίος	
	8	Μήλος	
9	Σίφνος		
	Θήρα Κύθνος		

4.5.3 Αποτελέσματα Hub-to-Hub Routing

Για να ολοκληρωθεί το ακτοπλοϊκό δίκτυο που μελετάται, απαιτείται η εύρεση της διαδρομής του μεγάλου πλοίου με αφετηρία το λιμάνι του Λαυρίου. Όπως και προηγουμένως, η εύρεση της διαδρομής αυτής πραγματοποιείται με δύο τρόπους.

Αρχικά με τη λύση του προβλήματος του Πλανόδιου Πωλητή (ΠΠΠ) - Traveling Salesman Problem (TSP) όπου η διαδρομή που προέκυψε ελαχιστοποιώντας τη διανυθείσα απόσταση είναι η εξής:

- Λαύριο→Τήνος→Ρόδος→Κως→Σέριφος→Λαύριο

διανύοντας συνολικά 504 ναυτικά μίλια.

Εξυπηρετώντας αρχικά τα λιμάνια με τη μεγαλύτερη ζήτηση προέκυψε η εξής διαδρομή.

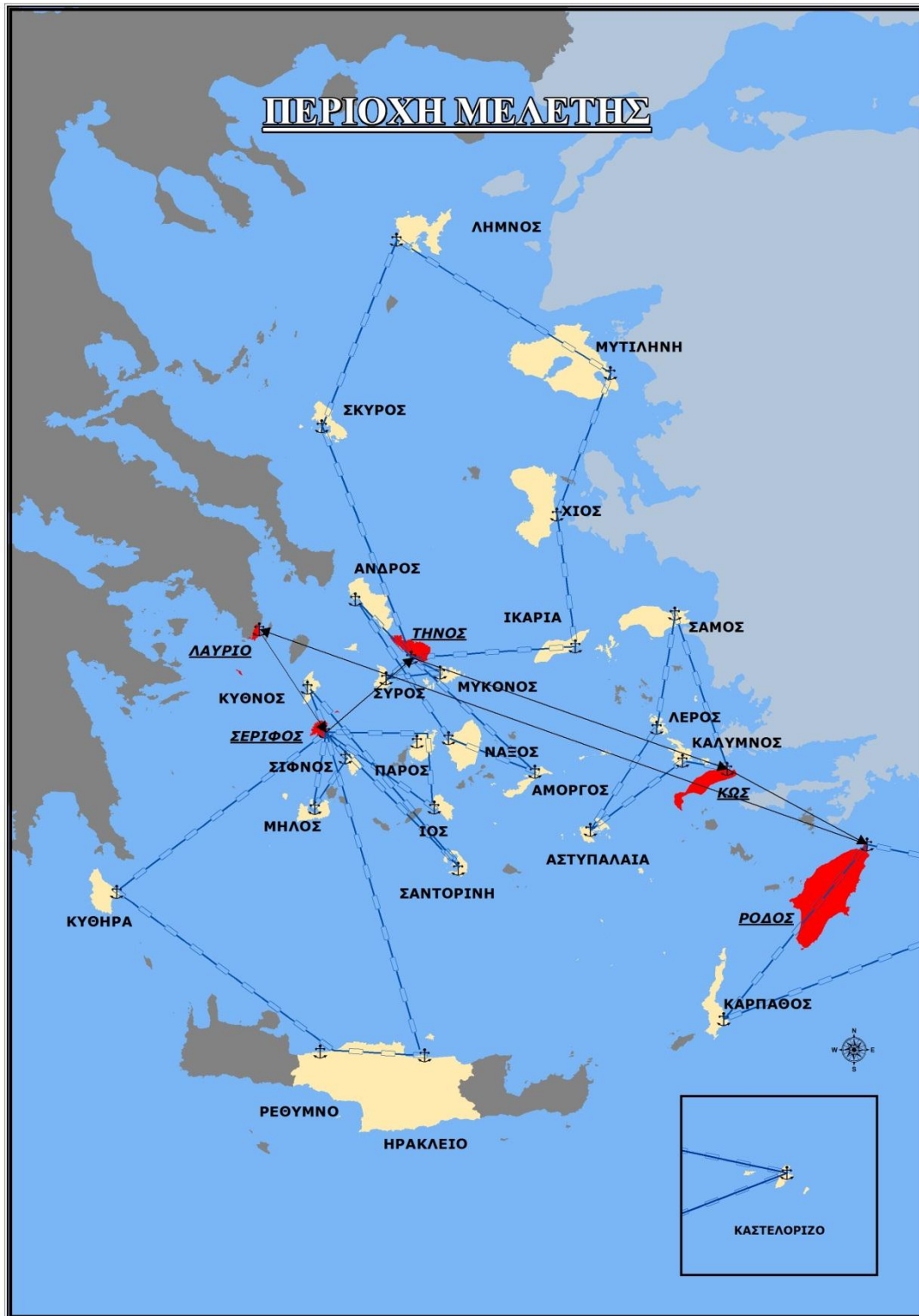
- Λαύριο→Σέριφος →Τήνος→Κως→Ρόδος→Λαύριο

διανύοντας συνολικά 512 ναυτικά μίλια.

Λόγω της μικρής διαφοράς της διανυθείσας απόστασης προτιμάται η δεύτερη κατά σειρά επιλογή καθώς επιτυγχάνεται ταυτόχρονα και η ταχύτερη εξυπηρέτηση της μεγαλύτερης ζήτησης.

4.5.4 Συνολικά αποτελέσματα δικτύου

Συνδυάζοντας τελικά τα τρία στάδια επίλυσης του προβλήματος, προκύπτει το συνολικό Hub&Spoke δίκτυο για την περιοχή μελέτης, όπου η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι 95,688. Το εν λόγω δίκτυο παρουσιάζεται στον παρακάτω χάρτη.



Χάρτης 4.4: Δρομολόγηση πλοίων – Περίπτωση τεσσάρων Hub

4.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Συνοψίζοντας, δημιουργήθηκαν τρία δίκτυα Hub&Spoke βάσει της μεθοδολογικής διαδικασίας που προτάθηκε στο κεφάλαιο 3. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.18: Σύγκριση αποτελεσμάτων

Number of Hubs	Total Fitness
2	96.561
3	89.049
4	95.688

Είναι φανερό πως η βέλτιστη λύση όσον αφορά την αντικειμενική συνάρτηση παρατηρείται για την περίπτωση των τριών (3) Hub για την περιοχή μελέτης. Το εν λόγω ακτοπλοϊκό δίκτυο αποτελείται από μια (1) διαδρομή μεταξύ των Hub με αφετηρία το λιμάνι του Λαυρίου και εννέα (9) διαδρομές από τα Hub προς τα αντίστοιχα Spokes.

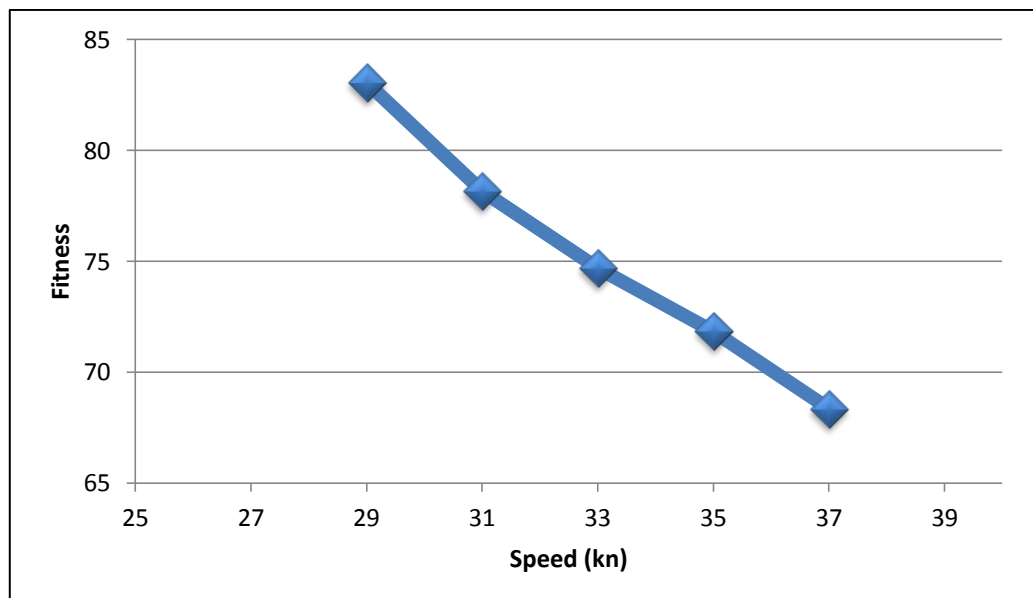
4.7 Ανάλυση ευαισθησίας

Εφόσον βρέθηκε η λύση που επιλύει με το βέλτιστο τρόπο το πρόβλημα, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας για αυτή τη λύση και συγκεκριμένα για το πρόβλημα της δρομολόγησης των πλοίων από τα Hub προς τα Spokes. Οι παράμετροι με τις οποίες θα εφαρμοστεί η ανάλυση είναι η ταχύτητα κίνησης των πλοίων, η χωρητικότητα τους και η ζήτηση για τη χρήση του δικτύου.

4.7.1 Ταχύτητα κίνησης

Όπως είναι λογικό η μεταβολή της ταχύτητας των πλοίων επηρεάζει την συνάρτηση ικανότητας, με αύξηση αυτής να μειώνει τη συνάρτηση, αφού μειώνεται ο χρόνος διαδρομής, και μείωση της ταχύτητας να την αυξάνει. Όπως ήταν αναμενόμενο ο αριθμός των διαδρομών δεν αλλάζει καθώς επηρεάζεται από τον αριθμό των επιβατών. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε και για τα τρία(3) Hub, για ταχύτητα κίνησης 29, 31, 35, 37 κόμβων.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.

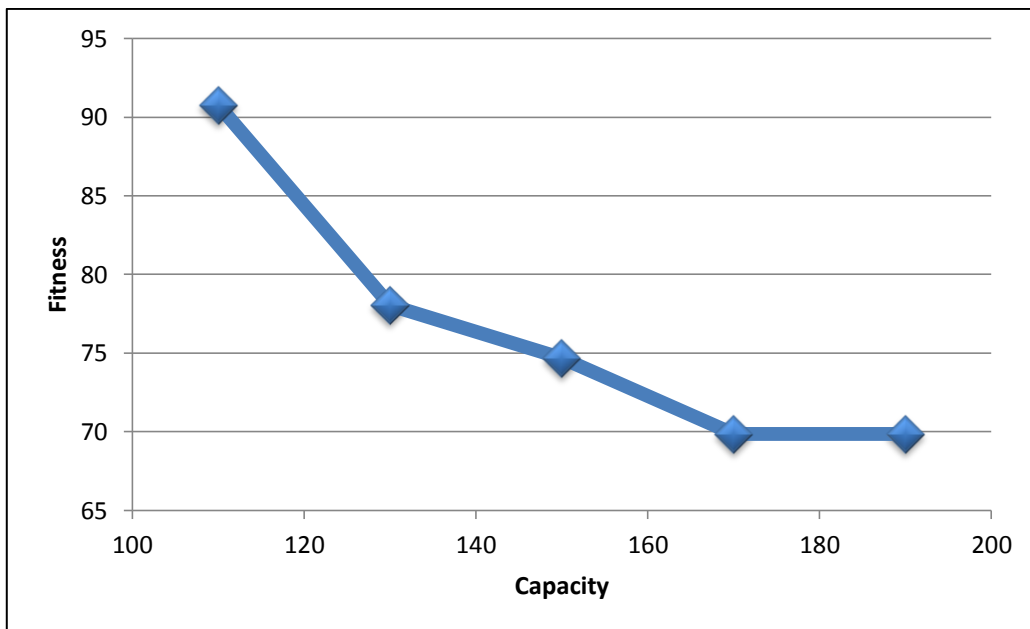


Διάγραμμα 4.1: Μεταβολή της συνάρτησης ικανότητας σε σχέση με την ταχύτητα κίνησης

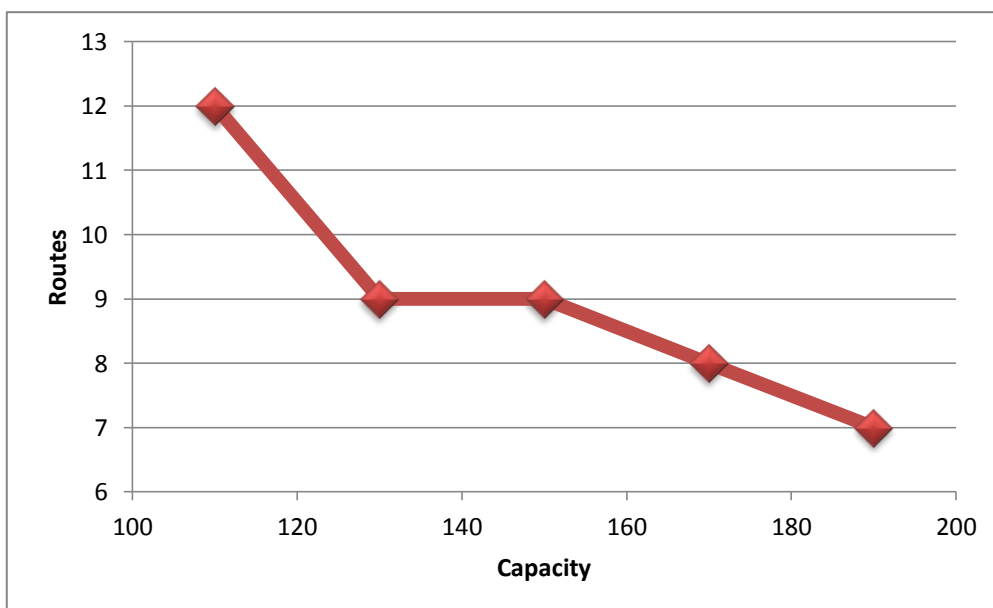
4.7.2 Χωρητικότητα πλοίου

Από την ανάλυση ευαισθησίας ως προς τη χωρητικότητα των οχημάτων παρατηρείται πως με αύξηση της χωρητικότητας, μειώνεται η τιμή της συνάρτησης ικανότητας και αντίστροφα, κάτι επίσης λογικό. Αντίστοιχη μεταβολή υπάρχει και για τον αριθμό των διαδρομών που απαιτούνται για τη λειτουργία του δικτύου, καθώς, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο αριθμός των διαδρομών επηρεάζεται από τη χωρητικότητα των οχημάτων. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε και για τα τρία(3) Hub, για χωρητικότητα 110, 130, 170, 190 κόμβων.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 4.2: Μεταβολή της συνάρτησης ικανότητας σε σχέση με τη χωρητικότητα

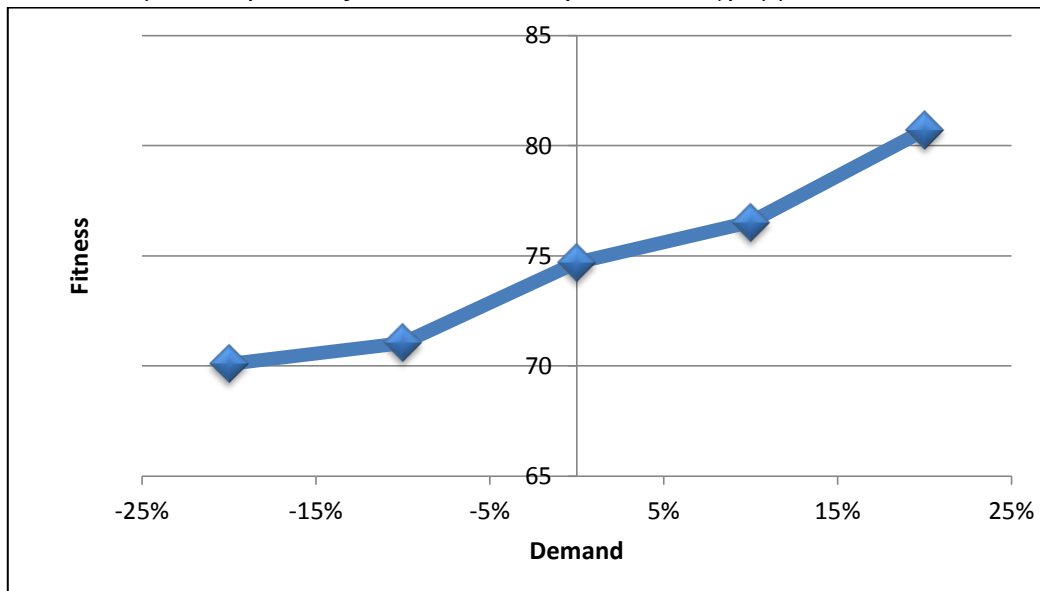


Διάγραμμα 4.3: Μεταβολή του αριθμού των διαδρομών σε σχέση με τη χωρητικότητα

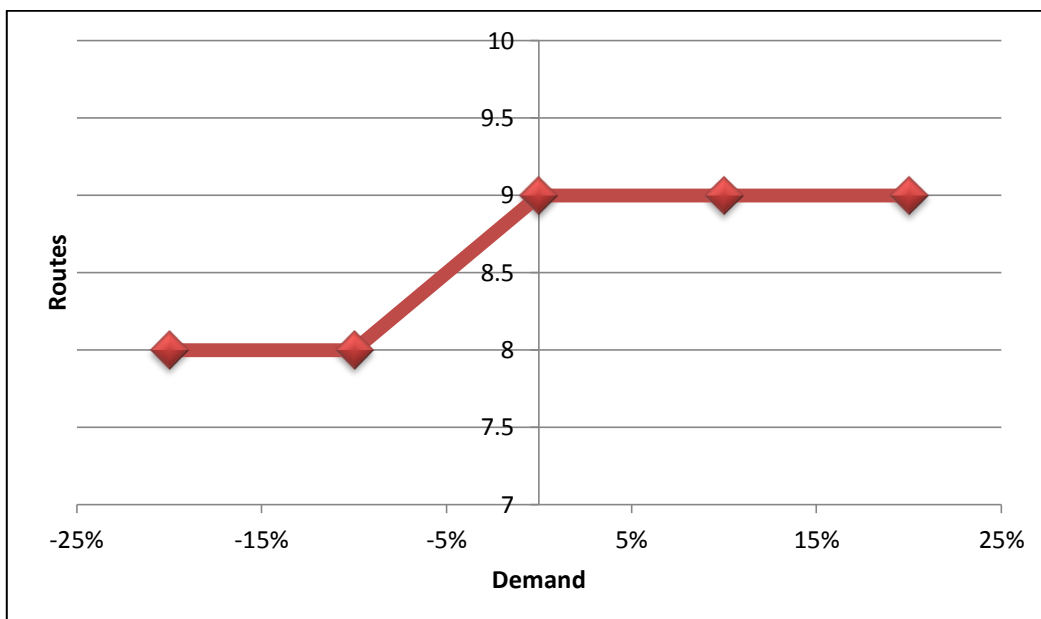
4.7.3 Ζήτηση

Τέλος, τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας με μεταβολή της ζήτησης από τους επιβάτες για χρήση του δικτύου έδειξαν πως μείωση του αριθμού των ατόμων που επιθυμούν να χρησιμοποιήσουν τα πλοία οδηγεί σε μείωση τόσο της αντικειμενικής συνάρτησης όσο και του αριθμού των διαδρομών. Αντίθετα αύξηση του αριθμού των επιβατών οδηγεί σε αύξηση της συνάρτησης όπως και αναμενόταν. Ωστόσο δεν παρατηρείται αύξηση του αριθμού των διαδρομών, συνεπώς σε αυτή την περίπτωση η χωρητικότητα του πλοίου επαρκεί για τις ανάγκες της ζήτησης που θεωρήθηκε. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε και για τα τρία(3) Hub, για αλλαγή της ζήτησης κατά -20%, -10%, 10%, 20%.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και στα παρακάτω διαγράμματα.



Διάγραμμα 4.4: Μεταβολή της συνάρτησης ικανότητας σε σχέση με τη ζήτηση



Διάγραμμα 4.5: Μεταβολή του αριθμού των διαδρομών σε σχέση με τη ζήτηση

4.8 Συμπεράσματα

Σε αυτή την ενότητα αναλύονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν σχετικά με την εφαρμογή του μεθοδολογικού πλαισίου, στην περιοχή μελέτης που μελετήθηκε.

4.8.1 Γενετικός αλγόριθμος

Αρχικά, αξίζει να αναφερθεί πως τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου στο πρόβλημα έδειξαν πως η επιλογή των συντελεστών για τις παραμέτρους πληθυσμού, διασταύρωσης και μετάλλαξης παίζει σημαντικό ρόλο κυρίως σε μεγάλα δίκτυα όπως στην περίπτωση του Hub της Ίου με 17 λιμάνια-Spokes. Αντίθετα σε μικρά δίκτυα για παράδειγμα οχτώ (8) λιμανιών, οι διαφοροποιήσεις που παρατηρήθηκαν ήταν μικρές ή ακόμα και μηδενικές.

Επιπλέον, οι μικρές σχετικά διαφορές που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της εφαρμογής του γενετικού αλγορίθμου ακόμα και για τις διαφορετικές παραμέτρους του οδηγούν στο συμπέρασμα πως έχει αποφευχθεί εγκλωβισμός σε κάποιο τοπικό βέλτιστο, ή όπως λέμε ο αλγόριθμος συγκλίνει. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις που ο αλγόριθμος, όταν εντοπίζει μια σχετικά «καλή» λύση σταματάει εκεί, ή όπως αναφέρεται συγκλίνει πρώιμα. Αυτή η «παγίδευση» του αλγορίθμου σε κάποιο τοπικό ελάχιστο έχει ως αποτέλεσμα ακόμα και για τον ίδιο συνδυασμό παραμέτρων του γενετικού την ύπαρξη σημαντικών διαφορών στην αντικειμενική συνάρτηση.

4.8.2 Ανάλυση ευαισθησίας

Όσον αφορά την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε με βάση το καλύτερο αποτέλεσμα του αλγορίθμου προέκυψε πως η συνάρτηση ικανότητας είναι ευαίσθητη σε αλλαγές στην ταχύτητα κίνησης, τη χωρητικότητα και τη ζήτηση.

Αρχικά η μεταβολή της ταχύτητας κίνησης των πλοίων έχει ως αποτέλεσμα και αντίστοιχη μεταβολή της συνάρτησης ικανότητας. Αυτή η μεταβολή οφείλεται στο ότι, όπως είναι προφανές, αύξηση της ταχύτητας κίνησης οδηγεί σε μείωση του χρόνου διαδρομής και αντίστροφα. Αντίθετα, η ανάλυση έδειξε πως η δεύτερη παράμετρος που εξετάστηκε, της χωρητικότητας των οχημάτων, επηρεάζει τη συνάρτηση ικανότητας και μέσω των διαδρομών που απαιτούνται, καθώς μεταβολές αυτής επιφέρουν και μεταβολές του απαιτούμενου αριθμού διαδρομών. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό καθώς αλλαγές στη χωρητικότητα των οχημάτων σημαίνουν αλλαγές στον αριθμό των επιβατών που μπορεί να καλύψει κάθε πλοίο, έτσι για παράδειγμα αν θεωρηθεί πως η ζήτηση για χρήση του δικτύου παραμένει σταθερή, μείωση της χωρητικότητας σημαίνει πως χρειάζονται περισσότερα πλοία από πριν για να εξυπηρετήσουν τη ζήτηση. Αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν από την ανάλυση ευαισθησίας σε σχέση με τη ζήτηση για χρήση των οχημάτων, δηλαδή μείωση της ζήτησης οδηγεί σε μείωση της συνάρτησης ικανότητας και αντίστροφα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο κεφάλαιο αυτό, πραγματοποιείται μια σύνοψη της παρούσας εργασίας και των αποτελεσμάτων, όπως αυτά προέκυψαν με την ολοκλήρωσή της. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται κάποια σημαντικά συμπεράσματα καθώς και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα που άπτονται του αντικειμένου της εν λόγω μελέτης.

5.1 Σύνοψη μελέτης και αποτελεσμάτων

Στο πλαίσιο της εν λόγω διπλωματικής εργασίας, αναπτύχθηκε ένα πρότυπο για το βέλτιστο σχεδιασμό ενός ακτοπλοϊκού δικτύου, στο πλαίσιο ενός “Hub&Spoke” συστήματος. Αντικείμενο της μελέτης αποτέλεσε τόσο η μεθοδολογία επιλογής των απαραίτητων κεντρικών λιμανιών (Hub) και η σύνδεση τους με άλλα νησιά (Spoke), όσο και η δρομολόγηση του απαραίτητου στόλου πλοίων, λαμβάνοντας υπ’ όψιν την απόσταση μεταξύ των νησιών, καθώς και την αντίστοιχη ζήτηση. Κατ’ αυτόν τον τρόπο, στη διαδικασία δόμησης του προτύπου υπεισέρχονται παράμετροι σχεδιασμού και λειτουργίας, η συνεκτίμηση των οποίων έχει ως απώτερο σκοπό τη δημιουργία ακτοπλοϊκών δικτύων που θα εξυπηρετούν τόσο τη ζήτηση ως προς τα εκάστοτε λιμάνια αλλά παράλληλα θα μειώνεται όσο τον δυνατόν και η διανυθείσα απόσταση. Για το λόγο αυτό, τα προβλήματα διατυπώθηκαν μαθηματικά, στοχεύοντας στην ελαχιστοποίηση του μεταφορικού χρόνου καθώς και του αριθμού των διαδρομών. Επιπλέον, για την επίλυση του προβλήματος της δρομολόγησης των πλοίων εφαρμόστηκε ένας γενετικός αλγόριθμος.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκε η απαραίτητη βιβλιογραφική ανασκόπηση εργασιών που ασχολούνται με το σχεδιασμό δικτύων, ειδικότερα των ακτοπλοϊκών. Παρατέθηκε επαρκής βιβλιογραφία για το σύστημα Hub&Spoke που αφορά τόσο για τη χωροθέτηση των Hubs όσο και για τη δρομολόγηση των πλοίων από τα Spokes στα επιλεγθέντα Hubs.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αναπτύχθηκε η μεθοδολογική προσέγγιση που σχεδιάστηκε για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Συγκεκριμένα, το πρόβλημα του σχεδιασμού ακτοπλοϊκού δικτύου στο πλαίσιο Hub&Spoke συστήματος αναλύθηκε σε τρία υπο-προβλήματα, όπου δόθηκαν και οι αντίστοιχες μαθηματικές διατυπώσεις για την επίλυση τους. Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε μια εισαγωγή στους γενετικούς αλγόριθμους, όπου εξηγήθηκαν οι βασικές παράμετροι που εφαρμόζονται και παρουσιάστηκαν τα πλεονεκτήματα που έχει η χρήση γενετικών αλγόριθμων και οι λόγοι επιλογής για το πρόβλημα της παρούσας εργασίας. Τέλος, παρουσιάστηκαν τα χαρακτηριστικά του γενετικού αλγόριθμου που χρησιμοποιήθηκε για το πρόβλημα της δρομολόγησης των πλοίων.

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 με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας και προτείνονται ορισμένα θέματα για περαιτέρω διερεύνηση.

5.2 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται ολοκληρωμένα με το σχεδιασμό ενός ακτοπλοϊκού δικτύου στο πλαίσιο ενός Hub&Spoke συστήματος, παρουσιάζοντας μια λεπτομερή αντιμετώπιση του προβλήματος που περιλαμβάνει τη χωροθέτηση των Hubs, τη δρομολόγηση των πλοίων από τα Hubs προς τα Spokes καθώς και τη δρομολόγηση του πλοίου της κεντρικής διαδρομής από την αφετηρία προς τα επιλεγθέντα Hubs που συνθέτουν τελικά το τελικό δίκτυο. Επιπλέον, λαμβάνονται υπ' όψιν οι λειτουργικοί περιορισμοί των οχημάτων, οι απαιτήσεις των επιβατών, καθώς και το οικονομικό συμφέρον των ακτοπλοϊκών εταιριών, ελαχιστοποιώντας τη διανυθείσα απόσταση των πλοίων.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο αλγόριθμος μπορεί να εφαρμοστεί για τη δημιουργία διαδρομών από μια εταιρεία για τη δρομολόγηση πλοίων, καθώς ανταποκρίνεται σε ρεαλιστικές συνθήκες, ενώ απαιτεί σχετικά μικρό υπολογιστικό χρόνο.

Η ευελιξία του αλγόριθμου που δημιουργήθηκε, άλλα και ο σχετικά μικρός υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται, και επιτρέπει την εκτέλεση του πολλές φορές με τα δεδομένα, δίνει τη δυνατότητα άμεσης εύρεσης των βέλτιστων διαδρομών. Το γεγονός αυτό τον καθιστά ελκυστικό, καθώς οι περισσότερες προσεγγίσεις του προβλήματος περιλαμβάνουν πολυεπίπεδη βελτιστοποίηση, η οποία απαιτεί περισσότερο χρόνο και έρευνα.

5.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται προτάσεις περαιτέρω έρευνας τόσο όσον αφορά στη διαφοροποίηση της αλγοριθμικής αντιμετώπισης του προβλήματος που διατυπώθηκε όσο και για επέκταση του προβλήματος σε περίπτωση μελλοντικής έρευνας.

Αρχικά, θα μπορούσε να διαφοροποιηθεί η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος που λήφθηκε ίση με το άθροισμα του συνολικού χρόνου διαδρομής και του αριθμού των απαιτούμενων διαδρομών. Παράλληλα, είναι εφικτό να εισαχθούν περισσότερες μεταβλητές στην αντικειμενική συνάρτηση, όπως για παράδειγμα διαφορετικοί τύποι πλοίων, φερ' ειπείν χάρη διαφορετικής χωρητικότητας, που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες. Επιπλέον, θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη για κάθε τύπο πλοίου η κατανάλωση του καυσίμου ώστε να επιτυγχάνεται ο βέλτιστος συνδυασμός. Αξίζει να επισημανθεί πως σημαντική παράμετρος που θα μπορούσε να διαφοροποιήσει τα αποτελέσματα είναι το κόστος

εγκατάστασης ενός Hub αλλά και το κατά πόσο είναι εφικτό να εγκατασταθεί σε κάποιο νησί. Τέλος, όσον αφορά στους περιορισμούς θα μπορούσε να εισαχθεί συγκεκριμένος αριθμός διαθέσιμου στόλου πλοίων ώστε ο συνολικός αριθμός οχημάτων που θα χρησιμοποιηθούν να μην τον ξεπερνά.

Επίσης, υπάρχουν αρκετές μετατροπές που μπορούν να πραγματοποιηθούν στον αλγόριθμο που κατασκευάστηκε σε αυτή την εργασία, ώστε να τον κάνουν ακόμη πιο αποτελεσματικό. Για παράδειγμα, είναι πιθανό η αρχική λύση που παράγεται τυχαία από τον αλγόριθμο να επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα. Έτσι, πιθανόν τα αποτελέσματα του αλγορίθμου αλλά και οι υπολογιστικοί χρόνοι να βελτιωθούν ακόμη περισσότερο, εάν οι αρχικοί πληθυσμοί δεν παράγονται τυχαία, αλλά μέσω μιας ευριστικής μεθόδου. Τέλος, θα παρουσίαζε ενδιαφέρον να ερευνούνταν και διαφορετικοί τρόποι-κριτήρια για τη διακοπή της διαδικασίας των επαναλήψεων του αλγορίθμου, ωστόσο θα οδηγούσε, πιθανώς, και σε αύξηση του υπολογιστικού χρόνου, ακόμα και σε περιπτώσεις που δεν είναι αναγκαίο.

Αξίζει να σημειωθεί πως ένα ακτοπλοϊκό δίκτυο τέτοιου είδους είναι αρκετά ρίζοσπαστικό για τον Ελλαδικό χώρο. Επομένως, σε μελλοντικές έρευνες θα πρέπει να ληφθούν και άλλοι παράμετροι, έτσι ώστε να είναι η εφικτή και αποδοτική η λειτουργία ενός δικτύου Hub&Spoke. Σημαντική παράμετρος είναι οι ακραίες καιρικές συνθήκες που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις μεταφορές στο Αιγαίο. Έτσι, οι επιβάτες θα πρέπει να είναι ενήμεροι σε τέτοια περίπτωση, για το αν θα πραγματοποιηθεί η διαδρομή από το Hub προς τον τελικό τους προορισμό, διαφορετικά θα παρατηρηθεί σημαντικό πρόβλημα στην εξυπηρέτηση των επιβατών άρα και μείωση της κερδοφορίας της εταιρίας. Επιπροσθέτως, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο συγχρονισμός του μεγάλου πλοίου με τα μικρά που εξυπηρετούν τα Spokes, ώστε να επιτυγχάνεται ένα αποτελεσματικό δίκτυο μεταφορών επιβατών. Παράλληλα, μπορεί να διερευνηθεί κατά πόσο είναι δυνατή η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου μοντέλου που θα επιλύει ταυτόχρονα τα προβλήματα τόσο της χωροθέτησης των Hubs όσο και της δρομολόγησης των πλοίων. Έτσι, θα υπάρξει η δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων με την παρούσα εργασία με απώτερο σκοπό τη διερεύνηση αν και κατά πόσο παρατηρούνται διαφοροποιήσεις.

Συνοψίζοντας, υπάρχουν πολλές προοπτικές διερεύνησης του εν λόγω αντικειμένου μελέτης, τόσο μέσω της βελτίωσης της αλγοριθμικής προσέγγισης για την επίλυση του προβλήματος, όσο και μέσω του σχεδιασμού προτάσεων και λύσεων συνολικής αντιμετώπισης του προβλήματος, έτσι ώστε να καταστεί μια ρεαλιστική εναλλακτική επιλογή στο πλαίσιο των θαλάσσιων μεταφορών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Γεωργόπουλος,Ε.Φ., Λυκοθανάσης,Σ.Δ., 1999. “Εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγορίθμους ”, Π Πανεπιστήμιο Πατρών,Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών & Πληροφορικής
- Ίδρυμα Οικονομικών και Βιομηχανικών Ερευνών –IOBE,(2014), «Η συμβολή της Ελληνικής Ακτοπλοΐας στην Ελληνική Οικονομία: Επιδόσεις και Προοπτικές»
- Καρλαύτης,Μ.Γ., Λαγαρός, Ν.Δ., (2010). «Επιχειρησιακή Έρευνα και Βελτιστοποίηση για Μηχανικούς», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα
- Κολέτσος & Στόγιαννης, (2017), «Εισαγωγή στην επιχειρησιακή έρευνα», 3^η Έκδοση, Εκδόσεις Συμμετών, Αθήνα
- Λυκοθανάσης, Σ. (2001). „Γενετικοί Αλγόριθμοι και Εφαρμογές. Τεχνητή Νοημοσύνη Εφαρμογές».
- Μαθιουδάκης Γ. (2017), «Διερεύνηση της Ανταγωνιστικότητας Ακτοπλοΐας-Αερομεταφορών στο Τουριστικό Προϊόν στην Ελλάδα», Πανεπιστήμιο Πειραιώς
- Ρόθος & Λυρίδης, (2014), «Μελέτη και αξιολόγηση μοντέλων σχεδιασμού δικτύων μεταφορών», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Ξένη Βιβλιογραφία

- An, Y., et al. (2015). "The reliable hub-and-spoke design problem: Models and algorithms." *Transportation Research Part B: Methodological* 77: 103-122.
- Bjarnadottir, A.S., 2003, Solving the vehicle routing problem with genetic algorithms, Ph.D. T 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.
- Chan,Y., 1974. “Configuring a Transportation Route Network via the Method of Successive Approximation.” *Computers & Operations Research* 1 (3): 385–420.
- Charisis A., et al. (2016), “Demand-Responsive Transit Feeder Route Design for Urban Subway Stations”, TRB Annual Meeting Online.
- Farahani, R. Z., et al. (2013). "Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications." *Computers & Industrial Engineering* 64(4): 1096-1109
- Festen-Purohit (2009), “Feasibility of the Hub-and-spoke principle for LNG supply chains into Northwest Europe”, MSc. Thesis in Maritime Economics and Logistics, University Rotterdam.
- Griva, I., Nash,S.G., Sofer,A., 2009. *Linear and Nonlinear Optimization*. SIAM.

- Holmberg, K., Hellstrand, 1998. "Solving the Uncapacitated Network Design Problem by a Lagrangian 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.
- Iliopoulou, C., et al. (2015). "Route planning for a seaplane service: The case of the Greek Islands." *Computers & Operations Research* 59: 66-77.
- Iliopoulou, C., et al. (2018). "Energy supply security for the Aegean islands: A routing model with risk and environmental considerations." *Energy Policy* 113: 608-620.
- 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.
- Konings, R., et al. (2013). "Major considerations in developing a hub-and-spoke network to improve the cost performance of container barge transport in the hinterland: the case of the port of Rotterdam." *Journal of Transport Geography* 29: 63-73.
- Lenstra, J.K., Kan, A.H.G., 1981. "Complexity of Vehicle Routing and Scheduling Problems." *Networks* 11 (2): 221–227.
- Lyridis, D. V., et al. (2005). "Optimizing shipping company operations using business process modelling." *Maritime Policy & Management* 32(4): 403-420.
- O'Kelly, M.E. (1986b), "Activity levels at hub facilities in interacting networks", *Geographical Analysis* 18, 343-356.
- Psaraftis, H.N. (2007), "Greek Coastal System and Capotage", Evgenidio Foundation Publishers.
- Prins, C., 2004. "A Simple and Effective Evolutionary Algorithm for the Vehicle Routing Problem." *Computers & Operations Research* 31 (12): 1985–2002.
- 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.

- 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.
- Schinas O., "Exploring the possibility for hub-and-spoke services in the Greek Coastal System", nt. *J. Ocean Systems Management*, Vol. 1, No. 2, 2009.
- 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.
- Toth, P., Vigo, D., 2002. *The Vehicle Routing Problem*. SIAM.
- Zheng, J., et al. (2015). "Liner hub-and-spoke shipping network design." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 75: 32-48.
- Zheng, J. and D. Yang (2016). "Hub-and-spoke network design for container shipping along the Yangtze River." *Journal of Transport Geography* 55: 51-57.

Π Α Ρ Α Ρ Τ Η Μ Α

-

ΚΩΔΙΚΑΣ VISUAL BASIC

```

Sub renumb()
For i = 1 To 17
    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(17), b(17), c(17) As Integer
For i = 1 To 17
    a(i) = i
    b(i) = 0
Next i
k = 1
While k <= 17
    d = Int(17 * Rnd() + 1)
    For i = 1 To 17
        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 18

    Worksheets("data").Cells(i, 1).Value = c(i - 1)
Next i
End Sub

Sub getroutes()
Dim st(17) As Single, dd(17, 17) As Single, d0(17) As Single, d31(17) As Single, unserv(17)
As Integer
Dim an(17), ind(17) As Integer, tb(17) As Single, srpos()
For i = 2 To 18
getnew = Worksheets("data").Cells(i, 1).Value
    For j = 32 To 48
        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 - 30, 1).Value
        d31(i - 1) = Worksheets("demand2").Cells(j - 30, 21).Value
        End If
    Next j
Next i
cap = Worksheets("data").Cells(51, 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 MAXTOT = cap Then
free = cap - Total
ind(i) = rtnum
        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 > 17 Then stopit = 1
Wend
Worksheets("data").Cells(2, 6).Value = rtnum
For i = 1 To 17
    Worksheets("data").Cells(i + 1, 2).Value = ind(i)
Next i
For i = 1 To 17
a = Worksheets("data").Cells(i + 1, 1).Value
    For j = 32 To 48
        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
For i = 1 To 17
Next i
ReDim srpos(rtnum + 1), pen(rtnum)
counter = 0
ind(0) = 0
For i = 1 To 17
    If ind(i - 1) < ind(i) Then
        counter = counter + 1
        srpos(counter) = i
        rtnum = counter
    End If
Next i
srpos(rtnum + 1) = 18
tot = 0
ReDim tot99(rtnum + 1)
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(56 + an(j), 1 + an(j + 1)).Value + st(j)
    Next j
tot99(i) = dist + st(b) + dist0a + distb0
Worksheets("data").Cells(i + 1, 10).Value = tot99(i)

```

```

Next i
End Sub
Function TotalCost(value1) As Single
Dim st(17) As Single, dd(17) As Single, pen() As Double, d0(17) As Single, d31(17) As
Single, unserv(17) As Integer
Dim an(17), ind(17) As Integer, tb(17) As Single, ss(17) As Single, srpos(), tot99() As Single
For i = 2 To 18
getnew = Worksheets("data").Cells(i, 1).Value
    For j = 32 To 48
        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 - 30, 1).Value
            d31(i - 1) = Worksheets("demand2").Cells(j - 30, 21).Value
        End If
    Next j
Next i
Next i
cap = Worksheets("data").Cells(51, 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

```

```

        End If
    If MAXTOT = cap Then
    free = cap - Total
    ind(i) = rtnum
        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 > 17 Then stopit = 1
Wend
For i = 1 To 17
Next i
ReDim srpos(rtnum + 1), pen(rtnum)
counter = 0
ind(0) = 0
For i = 1 To 17
    If ind(i - 1) < ind(i) Then
        counter = counter + 1
        srpos(counter) = i
        rtnum = counter
    End If
Next i
srpos(rtnum + 1) = 18
tot = 0
ReDim tot99(rtnum + 1)
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(56 + an(j), 1 + an(j + 1)).Value + st(j)
  Next j
tot99(i) = dist + st(b) + dist0a + distb0
Next i
For k = 1 To rtnum
  tot = tot + tot99(k)
Next k
TotalCost = tot + rtnum
End Function

```