



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΠΛΟΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ
ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ ΜΕ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΥΣ
ΧΡΟΝΟΥΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ, ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΕΣ ΠΑΡΑΛΑΒΕΣ
ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΣΕΙΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΙΚΟΥΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ: Η
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ ΠΕΛΑΓΟΥΣ**



Γρηγόριος Φούντας

Επιβλέποντες:

Ματθαίος Καρλαύτης, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Νικόλαος Λαγαρός, Επίκ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ

2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΠΛΟΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ ΜΕ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΥΣ ΧΡΟΝΟΥΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ, ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΕΣ ΠΑΡΑΛΑΒΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΣΕΙΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΙΚΟΥΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ ΠΕΛΑΓΟΥΣ

Containership routing with stochastic travel times, simultaneous pick-ups and deliveries and time deadlines: The case of the Aegean Sea

Φούντας Γρηγόριος

Επιβλέποντες Καθηγητές:

Ματθαίος Καρλαύτης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Νικόλαος Λαγαρός, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2013

Το περιεχόμενο της ανά χειράς διπλωματικής εργασίας αποτελεί προϊόν της δικής μου πνευματικής προσπάθειας. Η ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων, δημοσιευμένου ή μη, γίνεται με δόκιμη αναφορά στις πηγές, που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες.

Η φωτογραφία του εξωφύλλου απεικονίζει το πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων «C/P VALOUR» και προέρχεται από την ιστοσελίδα www.tsavliris.com.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στο πλαίσιο του παρόντος προλόγου, δράττομαι της ευκαιρίας να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς όλα εκείνα τα πρόσωπα που διαδραμάτισαν σημαίνοντα ρόλο κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αλλά και γενικότερα καθ'όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Η στήριξή τους αλλά και η έμπρακτη βοήθειά τους υπήρξε καθοριστική τόσο για την εξέλιξη όσο και για την τελέσφορη κατάληξη της προπτυχιακής μου πορείας στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. και επιβλέποντά μου, κ. Ματθαίο Καρλαύτη, ο οποίος υπήρξε στην ουσία και ο εμπνευστής του συγκεκριμένου θέματος και με βοήθησε σημαντικά στη διερεύνηση των πολυεπίπεδων παραμέτρων του προβλήματος δρομολόγησης. Οι καίριες παρεμβάσεις του καθώς και οι προτάσεις του αποτέλεσαν εχέγγυα για την ορθή εξέλιξη της εργασίας αλλά και για τη διαμόρφωση του τελικού περιεχομένου της. Παράλληλα, οι διακεκριμένες ευχαριστίες μου εκπορεύονται και από το γενικότερο όφελος που αποκόμισα τα τελευταία χρόνια, μέσα από τη συνεργασία μας στα μαθήματα του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ. Πολιτικό Μηχανικό και Λέκτορα της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π. κ. Κωνσταντίνο Κεπαπτσόγλου για την άψογη συνεργασία καθώς και τη συνεχή και καταλυτική καθοδήγησή του καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Η εκ μέρους του παροχή χρήσιμων δεδομένων, εργαλείων και βιβλιογραφικού υλικού καθώς και οι εύστοχες παρατηρήσεις και επισημάνσεις του ήταν «εκ των ων ουκ άνευ» για την ολοκλήρωση της παρούσας προσπάθειας. Ευχαριστώ, παράλληλα, τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Νίκο Λαγαρό για τη συνδρομή του στην επίβλεψη της εργασίας.

Στο σημείο αυτό, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω και στην καλή μου φίλη και συνάδελφο Μοσχούλα Πτερνέα, για το πηγαίο ενδιαφέρον της, τις χρήσιμες προτάσεις της αλλά και για όλη την κοινή ακαδημαϊκή διαδρομή που μας συνδέει.

Ολοκληρώνοντας, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω εγκάρδια τους φίλους μου και την οικογένειά μου για τη στήριξη, τη συμπαράσταση, την υπομονή και ορισμένες φορές την ανοχή, που επέδειξαν κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών.

Γρηγόριος Φούντας

Δεκέμβριος 2013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τίτλος: «Δρομολόγηση πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων με στοχαστικούς χρόνους διαδρομής, ταυτόχρονες παραλαβές και παραδόσεις και χρονικούς περιορισμούς: Η περίπτωση του Αιγαίου πελάγους»

Η ισχυρή επίδραση των καιρικών συνθηκών στη λειτουργία των εμπορικών πλοίων επιδρά σημαντικά στο συνολικό χρόνο εν πλω αλλά και στο ολικό κόστος της μεταφορικής διαδικασίας. Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στο αντικείμενο της δρομολόγησης πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, με στοχαστική όμως θεώρηση των χρόνων διαδρομής, ένεκα της παραπάνω επίδρασης. Αναζητείται, δηλαδή, ο βέλτιστος καθορισμός διαδρομών για έναν ομοιογενή στόλο πλοίων που θα παραλαμβάνει, μεταφέρει και επιδίδει εμπορευματοκιβώτια μεταξύ ενός κεντρικού λιμένα και ενός συνόλου λιμένων που τροφοδοτούνται από αυτόν. Στο πλαίσιο αυτό, μορφώνεται ένα πρόβλημα δρομολόγησης με στοχαστικούς χρόνους διαδρομής, ταυτόχρονη παραλαβή και επίδοση εμπορευμάτων και χρονικούς περιορισμούς, για την επίλυση του οποίου αναπτύσσεται μεθευρετικός αλγόριθμος. Παράλληλα, οργανώνεται η διαδικασία για την εκτίμηση της πιθανοτικής κατανομής των χρόνων διαδρομής του κάθε πλοίου. Το αναπτυσσόμενο πρότυπο εφαρμόζεται σε ένα δίκτυο νησιωτικών λιμένων του Αιγαίου πελάγους. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή καταδεικνύουν ότι ένας μικρού μεγέθους στόλος επαρκεί για την εξυπηρέτηση των αναγκών του δικτύου με μικρές σχετικά καθυστερήσεις, ενώ η διερεύνηση σεναρίων, όπου μεταβάλλονται βασικές παράμετροι του προβλήματος, οδηγούν σε ενθαρρυντικά συμπεράσματα σχετικά με την αποδοτικότητα και την ευρωστία του αλγορίθμου.

ABSTRACT

Title: « Containership routing problem with stochastic travel times, simultaneous deliveries and pick-ups and time deadlines: The case of the Aegean Sea»

The strong effect of weather conditions on the operation of commercial vessels has a major influence on the total time at sea and on the total cost of the transport process. This thesis focuses on containership routing, with stochastic consideration of travel times due to the above effect. In this context, aims to determine optimal routes for a homogeneous fleet performing pick-ups, transport and deliveries of containers between a hub and several spoke ports, fed by the hub. The problem is originally formulated as a vehicle routing problem with stochastic travel times with simultaneous pick-ups and deliveries and time constraints and solved using a metaheuristics algorithm. The developed model is implemented to a network of island ports of the Aegean Sea. Results on the application of algorithm reveal that a small fleet is sufficient enough to serve network's islands, under the influence of minor delays. The investigation of alternative scenarios, characterized by changes in the problem's parameters, leads to encouraging conclusions in respect of efficiency and robustness of the algorithm.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Γενική ανασκόπηση των εμπορευματικών μεταφορών στο Αιγαίο πέλαγος-Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	1
1.2	Δομή της διπλωματικής εργασίας.....	5
2.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	7
2.1	Βιβλιογραφική ανασκόπηση προβλημάτων που εντάσσονται στη ναυτιλία γραμμών.....	7
2.2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση στοχαστικού προβλήματος δρομολόγησης	17
2.3	Βιβλιογραφική ανασκόπηση για την ανάλυση των ανεμολογικών δεδομένων στο Αιγαίο πέλαγος	18
3.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ	20
3.1	Ερευνητικό υπόβαθρο για τη δρομολόγηση στο Αιγαίο πέλαγος.....	20
3.2	Προτεινόμενες επεκτάσεις του προβλήματος δρομολόγησης	22
3.3	Διαμόρφωση του μαθηματικού προτύπου του προβλήματος.....	26
4.	ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕΘΕΥΡΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ	30
4.1	Γενικά στοιχεία επιλογής μεθόδου επίλυσης	30
4.2	Επίλυση του μαθηματικού προτύπου-Γενετικοί αλγόριθμοι	31
4.2.1	Η έννοια του γενετικού αλγορίθμου	31
4.2.2	Ανάπτυξη γενετικού αλγορίθμου για την επίλυση του προτύπου δρομολόγησης.....	33
4.3	Επίλυση του γενετικού αλγορίθμου	40
5.	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΩΝ ΧΡΟΝΩΝ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ.....	47
5.1	Γενικά- Εκτίμηση πιθανοτικής κατανομής ταχύτητας ανέμου	47
5.2	Ανάλυση του ανεμολογικού προφίλ του Αιγαίου πελάγους.....	49
5.3	Χάρτης ανεμολογικών παραμέτρων στο Αιγαίο πέλαγος.....	53
5.4	Επίδραση του ανέμου στην ταχύτητα του πλοίου.....	57
5.4.1	Άνεμοι και πρόκληση κυματισμών.....	58
5.4.2	Απομείωση ταχύτητας πλοίου λόγω κυματισμών	59
5.5	Εκτίμηση πιθανοτικής κατανομής για τους χρόνους διαδρομής	64
5.5.1	Γεωγραφική αποτύπωση της διαδρομής.....	65
5.5.2	Υπολογισμός κατανομής πυκνότητας-πιθανότητας ταχύτητας ανέμου για κάθε επιμέρους τμήμα της διαδρομής.....	66

5.5.3 Εκτίμηση συνολικής κατανομής της ταχύτητας του ανέμου για το ζεύγος προέλευσης-προορισμού.....	67
5.5.4 Προσδιορισμός της απώλειας ταχύτητας και εκτίμηση της συνολικής κατανομής ταχύτητας πλοίου.....	68
5.5.5 Εξαγωγή τελικής κατανομής χρόνου διαδρομής για το ζεύγος προέλευσης προορισμού 70	
6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΑΙΓΑΙΟ ΠΕΛΑΓΟΣ	72
6.1 Εισαγωγή.....	72
6.2 Το δίκτυο των νησιών στο Αιγαίο πέλαγος.....	72
6.3 Πλοίο αναφοράς για το υπό εξέταση δίκτυο.....	77
6.4 Υπολογισμός χρόνων διαδρομής	78
6.5 Καθορισμός παραμέτρων γενετικού αλγορίθμου	86
6.6 Αποτελέσματα του αλγορίθμου.....	88
6.6.1 Κύρια λύση δρομολόγησης.....	88
6.6.2 Εναλλακτική λύση δρομολόγησης	95
6.7 Ανάλυση ευαισθησίας.....	98
6.7.1 Γενικά.....	98
6.7.2 1 ^ο σενάριο: Μεταβολή του μέγιστου χρόνου διαδρομής.....	98
6.7.3 2 ^ο σενάριο: Μεταβολή της χωρητικότητας του πλοίου αναφοράς	100
6.7.4 3 ^ο σενάριο: Μεταβολή της παραμέτρου ποινής λόγω καθυστερήσεων	104
6.7.5 4 ^ο σενάριο: Μεταβολή του επιπέδου εμπιστοσύνης για τους χρόνους διαδρομής	105
6.8 Σύγκριση με προηγούμενη ερευνητική εργασία	108
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	111
7.1 Γενικά στοιχεία- Αποτελέσματα και συμπεράσματα.....	111
7.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	113
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	116

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

CCP:	Chance constrained programming
CFSP:	Coastal freight shipping problem
CVRP:	Capacitated vehicle routing problem
MIP:	Mixed Integer Programming
STT-VRPSPDTD:	Stochastic travel times- Vehicle routing problem with simultaneous pick-ups and deliveries and time deadlines
VRP:	Vehicle routing problem
ΓΑ:	Γενετικός αλγόριθμος
Ε/Κ:	Εμπορευματοκιβώτιο
ΠΠ:	Προέλευση Προορισμός
ΣΚ:	Συνάρτηση καταλληλότητας

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το παρόν κεφάλαιο διεισδύει στα προβλήματα που αντιμετωπίζει σήμερα ο κλάδος των εμπορευματικών μεταφορών στο Αιγαίο πέλαγος, εισάγοντας το πλαίσιο στο οποίο εντάσσεται το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας. Αναλύεται η αναγκαιότητα για την εξέταση του προβλήματος δρομολόγησης, καθορίζονται οι αναμενόμενοι στόχοι της διερεύνησης, ενώ περιγράφεται και η διάρθρωση του περιεχομένου της εργασίας.

1.1 Γενική ανασκόπηση των εμπορευματικών μεταφορών στο Αιγαίο πέλαγος-Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Η μορφολογία της Ελλάδας με την εκτεταμένη ακτογραμμή και το πλήθος των νησιών αναδεικνύει τον καθοριστικό ρόλο της ναυτιλίας στις επιβατικές και εμπορευματικές μεταφορές. Η Ελλάδα καταλαμβάνει το ένα τέταρτο του συνόλου της ακτογραμμής στην Ευρωπαϊκή Ένωση, ενώ τα νησιά συνιστούν το 19% του εδάφους της (Pantazis et al., 2013). Η γεωγραφική ιδιαιτερότητα της ελληνικής επικράτειας συνδέεται άμεσα με τις δυσχέρειες που εμφανίζονται στον τομέα των μεταφορών, αφού παράμετροι όπως οι αποστάσεις από την ηπειρωτική Ελλάδα και τα κεντρικά λιμάνια της ενδοχώρας, ο απομονωτισμός των απομακρυσμένων και μικρών νησιών, η εποχιακή διακύμανση της ζήτησης καθώς και η συχνή έλλειψη υποδομών συνιστούν ένα ιδιαίτερα σύνθετο περιβάλλον για τη χάραξη ενός αξιόπιστου και σταθερού μεταφορικού δικτύου.

Σήμερα στο Αρχιπέλαγος του Αιγαίου είναι θεσμοθετημένες περίπου 180 κύριες τακτικές ακτοπλοϊκές γραμμές¹ οι οποίες εξυπηρετούν τις ανάγκες μεταφοράς κατοίκων, επισκεπτών και εμπορευμάτων και συνδέουν τα 96 λιμάνια των νησιών με τα 42 της ηπειρωτικής χώρας. Βέβαια, η δρομολόγηση πλοίων και η τακτική λειτουργία δρομολογίων αφορά ένα ποσοστό αυτών που δεν ξεπερνά το 50%. Λόγω της ετερογένειας των διαφόρων νησιών ως προς το μέγεθος τους, την εσωτερική τους αγορά και τη γεωγραφική τους θέση μπορούν άτυπα να καταταχθούν σε τρεις κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία υπάγονται τα μεγάλα

¹ Όπως ορίζονται από την Υ.Α. 3331.1/31.10.2012

και τουριστικά νησιά (Κυκλάδες) όπου παρουσιάζουν προβλήματα ικανοποίησης της ζήτησης κατά τις περιόδους αιχμής και προβλήματα χαμηλής συχνότητας δρομολογίων κατά τις υπόλοιπες περιόδους του έτους. Μια άλλη κατηγορία απαρτίζουν τα μεσαία και μεγάλα νησιά που όμως βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις από την ελληνική ενδοχώρα (Δωδεκάνησα, Νοτιοανατολικό Αιγαίο) τα οποία αντιμετωπίζουν διαρκές πρόβλημα ακτοπλοϊκής εξυπηρέτησης. Τέλος, στην τρίτη και πιο δυσμενή από συγκοινωνιακή άποψη ομάδα νησιών ανήκουν εκείνα της λεγόμενης «άγονης γραμμής» που παραμένουν σε συνθήκες απομόνωσης ανεξαρτήτως εποχής (Επιστημονική Επιτροπή Ι.Τ.Α., 2006).

Όπως είναι πρόδηλο, η ναυτιλιακή αγορά κατέχει κυρίαρχη θέση στο χάρτη των εμπορευματικών μεταφορών στο Αιγαίο. Υπερέχει έναντι της αεροπορικής αγοράς λόγω χαμηλότερου μοναδιαίου κόστους μεταφοράς και λόγω έλλειψης επαρκούς αεροπορικής υποδομής στην πλειοψηφία των νησιών. Η μεταφορά αγαθών και βιομηχανικών προϊόντων πραγματοποιείται μέσω οδικών μεταφορέων (φορτηγών), που μεταφέρουν αγαθά από το σημείο προέλευσης στο σημείο προορισμού μέσω επιβατηγών πλοίων ή μέσω ενός στόλου μικρών φορτηγών πλοίων τα οποία μεταφέρουν κυρίως εμπορεύματα με σχετικά μικρότερη ζήτηση (Sambracos et al., 2004).

Τα ελληνικά νησιά σε σχέση με την ακτοπλοϊκή τους σύνδεση αντιμετωπίζουν μια σειρά από προβλήματα που συνήθως σχετίζονται με τους εξής παράγοντες:

- i) **Αυξημένο κόστος μεταφοράς λόγω των μεγάλων αποστάσεων και των παρεπόμενων προβλημάτων που εμφανίζονται.** Πιο συγκεκριμένα, το κόστος επιβαρύνεται τόσο από τη χρήση και τη χρονική δέσμευση του οδικού μεταφορέα όσο και από το ναύλο της τακτικής ναυτιλιακής γραμμής. Πρόσθετο κόστος εμφανίζεται λόγω των καθυστερήσεων που δημιουργούνται κατά την παράλληλη επιβίβαση και αποβίβαση επιβατηγών οχημάτων και φορτηγών, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες.
- ii) **Ανεπαρκείς υποδομές των λιμένων, που σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι συμβατές με τα διεθνή πρότυπα ασφαλείας.** Ιδιαίτερα στα μικρότερα και πιο απομακρυσμένα νησιά η πρόσβαση των πλοίων στη λιμενική υποδομή συχνά κρίνεται δυσχερής, ιδιαίτερα υπό την επίδραση έντονων καιρικών συνθηκών. Οι μεγάλες καθυστερήσεις ή ακόμα και η αδυναμία που παρουσιάζεται στην

παραλαβή και στην επίδοση προϊόντων οδηγεί σε ακόμα μεγαλύτερο κόστος ή ακόμα και σε ολική απαξίωση του μεταφερόμενου προϊόντος (εφόσον πρόκειται για ευπαθές). Ακόμα και στην περίπτωση που η μεταφορά γίνεται μέσω στόλου εμπορικών πλοίων, στα περισσότερα λιμάνια δεν είναι διαθέσιμος ο αναγκαίος εξοπλισμός φορτοεκφόρτωσης των εμπορευμάτων και των μοναδοποιημένων φορτίων.

- iii) **Ανεπάρκεια χωρητικότητας στα επιβατηγά πλοία.** Η περιορισμένη χωρητικότητα των τακτικών επιβατηγών πλοίων σε φορτηγά δυσχεραίνει ακόμα περισσότερο τη διακίνηση των εμπορευμάτων προκαλώντας ακόμα μεγαλύτερες καθυστερήσεις ή ακόμα εισάγοντας και πρόσθετη μεταφόρτωση προκειμένου το προϊόν να φτάσει στο σημείο προορισμού. Ειδικότερα, σε περιόδους υψηλής τουριστικής κίνησης όπου τα ποσοστά πληρότητας των επιβατηγών εξαντλούν τη χωρητικότητα, εμφανίζονται και φαινόμενα μεταχρονολόγησης ή ματαίωσης της μεταφοράς.
- iv) **Ισχυρή εξάρτηση από τις καιρικές συνθήκες.** Ο χρόνος διαδρομής είναι άμεσα συνδεδεμένος με τις καιρικές συνθήκες. Η ένταση των καιρικών φαινομένων (ιδιαίτερα η επίδραση των ανέμων) επηρεάζει την απόδοση του πλοίου, αυξάνοντας το χρόνο διαδρομής και το χρόνο εξυπηρέτησης στο λιμένα και ακολούθως προκαλώντας πρόσθετη οικονομική επιβάρυνση στη μεταφορά. Μάλιστα, οι ελληνικές λιμενικές αρχές έχουν τη δυνατότητα να απαγορεύσουν τον απόπλου των επιβατηγών και οχηματαγωγών πλοίων όταν οι άνεμοι ξεπεράσουν τα 9 Μποφόρ είτε στο λιμένα απόπλου είτε σε οποιοδήποτε σημείο της προβλεπόμενης διαδρομής, γεγονός το οποίο οδηγεί σε εκτροχιασμό τη διαδικασία της μεταφοράς.

Η διαδικασία της μεταφοράς και ο τρόπος οργάνωσής της αποτελούν παραμέτρους ζωτικής σημασίας τόσο για τις εταιρείες διακίνησης των εμπορευμάτων όσο και για τον τελικό χρήστη. Για τις εταιρείες, η θαλάσσια μεταφορά απορροφά μεταξύ 1/3 και 2/3 του συνολικού κόστους της εφοδιαστικής αλυσίδας, ενώ για τη μεταφορά στα πιο απομακρυσμένα νησιά, όπου η επιβατηγός ναυτιλία λειτουργεί με αραιά δρομολόγια, το κόστος αυξάνεται αφού εμπλέκονται πρόσθετα μέσα μεταφοράς και σημειώνονται νέες μεταφορτώσεις. Αντίστοιχα, στον τελικό χρήστη μετακυλιέται η πρόσθετη επιβάρυνση λόγω της μεταφοράς καθώς και το αυξημένο κόστος χρήσης των προϊόντων, μιας και οι υψηλές

χρονικές διακυμάνσεις στην παράδοση των εμπορευμάτων ενδεχομένως οδηγεί σε καθυστέρηση της χρήσης τους και σε μερική απώλεια της αξίας τους. Κατά συνέπεια, ο σχεδιασμός ενός δικτύου θαλάσσιων μεταφορών για το Αιγαίο πέλαγος, στο πλαίσιο της ναυτιλίας μικρών αποστάσεων (short sea shipping), εκπορεύεται από την αναγκαιότητα αφενός περιορισμού του μεταφορικού κόστους αφετέρου εγκαθίδρυσης εμπορευματικών θαλάσσιων συνδέσεων με όρους υψηλής αξιοπιστίας αλλά και βιωσιμότητας.

Οι Sambracos(2000) και Sambracos et al.(2004) πρότειναν την εισαγωγή των μικρών εμπορευματοκιβωτίων (small containers), ως τύπο μοναδοποιημένου φορτίου, στη ναυτιλιακή διακίνηση των εμπορευμάτων στο Αιγαίο καθώς και τη χρήση ενός μικρού στόλου πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (containerships) που να εξυπηρετεί τις περιοδικές ανάγκες για μεταφορά στα νησιά, με εφαρμογή της παραπάνω τεχνολογίας. Τα μικρά εμπορευματοκιβώτια παρουσιάζουν πλεονεκτήματα όπως μικρότεροι χρόνοι φορτοεκφόρτωσης, μικρότερο κόστος χειρισμών, μικρότερη επένδυση σε εξοπλισμό και ευκολότερη μεταφορά μεταξύ μικρότερων λιμανιών και νησιωτικών αγορών με χαμηλή ζήτηση εμπορευμάτων και προϊόντων (Sambracos, 2000b), οδηγώντας σε σαφώς χαμηλότερο μεταφορικό κόστος. Οι Karlaftis et al. (2009), στην ίδια κατεύθυνση, εξετάσαν τη δρομολόγηση ενός στόλου της ίδιας κατηγορίας πλοίων για μεταφορά μικρών εμπορευματοκιβωτίων στο Αιγαίο, με χρονικούς περιορισμούς και ταυτόχρονη παραλαβή και επίδοση εμπορευμάτων στους λιμένες του δικτύου δρομολόγησης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιχειρείται επέκταση της υπάρχουσας γνώσης, αφού ερευνάται η δρομολόγηση πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων με χρονικούς περιορισμούς και ταυτόχρονες παραλαβές και επιδόσεις, θεωρώντας όμως ότι οι χρόνοι διαδρομής των πλοίων μεταξύ των διαφόρων λιμένων δεν παραμένουν σταθεροί αλλά άμεσα συσχετισμένοι με τις καιρικές συνθήκες. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα περίπτωση δρομολόγησης οι χρόνοι διαδρομής εισάγονται ως τυχαίες μεταβλητές και το πρόβλημα μετατρέπεται σε στοχαστικό. Στο πλαίσιο αυτό, δομείται ένας μεθευρετικός (ή μεταευρετικός) αλγόριθμος, ο οποίος προσεγγίζει το κλασικό πρόβλημα δρομολόγησης (vehicle routing problem) στόλου με όρους στοχαστικού προγραμματισμού. Με αυτόν τον τρόπο, αφενός επιδιώκεται η δημιουργία ενός δικτύου εμπορικής δρομολόγησης που θα απελευθερώνει την εμπορευματική διακίνηση από τις αγκυλώσεις και τα προβλήματα της επιβατηγού ναυτιλίας αφετέρου διατίθεται ένα εργαλείο ακριβέστερης προσέγγισης των

βέλτιστων διαδρομών τόσο στις ναυτιλιακές εταιρείες όσο και στους υπόλοιπους εμπλεκόμενους της εμπορικής ναυτιλίας (διαμεταφορείς, οδικούς μεταφορείς, λιμενικές αρχές, εταιρείες logistics). Για όλους τους παραπάνω φορείς ο βέλτιστος καθορισμός των διαδρομών ισοδυναμεί με πληρέστερη εκτίμηση του κόστους μεταφοράς.

1.2 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Το τεύχος της διπλωματικής εργασίας δομείται ως εξής:

1. Το δεύτερο κεφάλαιο παρέχει μια σύνοψη των ερευνητικών εργασιών που έχουν ασχοληθεί με το πρόβλημα της δρομολόγησης πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών. Παράλληλα, παρουσιάζεται και το βιβλιογραφικό υπόβαθρο σχετικά με δύο βασικές παραμέτρους του υπό μελέτη προβλήματος: τη στοχαστικότητα των χρόνων διαδρομής και την εκτίμηση των ανεμολογικών παραμέτρων στο Αιγαίο πέλαγος.
2. Το τρίτο κεφάλαιο της εργασίας εστιάζει στην ακριβή περιγραφή του προβλήματος δρομολόγησης, αφού πρώτα διαμόρφωνεται το γενικότερο πλαίσιο παραδοχών όπως αυτό τέθηκε από προηγούμενες ερευνητικές εργασίες για τη δρομολόγηση στο Αιγαίο. Επεξηγούνται οι ειδικές συνθήκες του υπό εξέταση αντικειμένου, σε επίπεδο σχεδιασμού και σε λειτουργικό επίπεδο. Τέλος, διαμορφώνεται το μαθηματικό πρότυπο του προβλήματος και ερμηνεύονται οι θεωρούμενοι περιορισμοί.
3. Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται η μεθοδολογία επίλυσης του μαθηματικού προτύπου της εργασίας. Παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο του μεθευρετικού αλγορίθμου που διαμορφώνεται ενώ αναπτύσσεται και ο γενετικός αλγόριθμος για την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου.
4. Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύεται και τυποποιείται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, ώστε να εκτιμηθεί η επίδραση των καιρικών συνθηκών στους χρόνους διαδρομής του θεωρούμενου δικτύου.
5. Το επόμενο Κεφάλαιο (Κεφάλαιο 6) παρουσιάζει αναλυτικά την εφαρμογή του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε σε πραγματικά δεδομένα του Αιγαίου πελάγους. Τα αποτελέσματα που εξάγονται, ερμηνεύονται σε συνδυασμό με τους ειδικούς

περιορισμούς που τέθηκαν, ενώ υλοποιείται και ανάλυση της ευαισθησίας του αλγορίθμου σε μεταβολές βασικών παραμέτρων του προβλήματος.

6. Στο Κεφάλαιο 7 συνοψίζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του αλγορίθμου, επισημαίνονται τα κυριότερα συμπεράσματα και προτείνονται για περαιτέρω διερεύνηση κρίσιμα σημεία του προβλήματος, που άπτονται του ευρύτερου επιστημονικού φάσματος της δρομολόγησης.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Το παρόν κεφάλαιο παρέχει μια γενική επισκόπηση της βιβλιογραφικής έρευνας σχετικά με το ευρύτερο πρόβλημα της δρομολόγησης. Οριοθετείται το ερευνητικό πλαίσιο εντός του οποίου τοποθετείται και το υπό εξέταση αντικείμενο και διακρίνονται τρεις κατηγορίες εργασιών που σχετίζονται με αυτό: προβλήματα δρομολόγησης στόλου που λειτουργικά ανήκει στον κλάδο της ναυτιλίας γραμμών, προβλήματα δρομολόγησης με στοχαστικούς χρόνους διαδρομής και εργασίες σχετικά με το στατιστικό καθορισμό της κατανομής των ανέμων στο Αιγαίο πέλαγος.

2.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση προβλημάτων που εντάσσονται στη ναυτιλία γραμμών

Στον κλάδο των θαλάσσιων μεταφορών διακρίνονται τρεις γενικές αλλά διακριτές κατηγορίες ανάλογα με το είδος της παρεχόμενης υπηρεσίας: η **βιομηχανική ναυτιλιακή αγορά** (industrial shipping), η **ελεύθερη αγορά πλοίων** (tramp shipping) καθώς και η **ναυτιλία γραμμών** (liner shipping) (Christiansen et al., 2004).

Στην πρώτη κατηγορία, ο εισαγωγέας ή ο εξαγωγέας του μεταφερόμενου φορτίου διαθέτει το δικό του ιδιόκτητο στόλο, προκειμένου να ελαχιστοποιήσει το κόστος μεταφοράς. Σε αυτόν τον τομέα της ναυλαγοράς, δραστηριοποιούνται μεγάλες βιομηχανίες, οι οποίες διακινούν μεγάλες ποσότητες προϊόντων, σε τακτά χρονικά διαστήματα. Η χρήση του ιδιόκτητου στόλου αποτελεί για αυτές εχέγγυο αξιόπιστης και οικονομικής μεταφοράς, ενώ ακόμα και σε περιόδους χαμηλού μεταφορικού έργου αποτελεί πηγή εσόδων μέσω της ναύλωσής του στην ελεύθερη αγορά (Χάλκος, 2008).

Στην ελεύθερη αγορά πλοίων (tramp shipping) τα φορτηγά πλοία εκτελούν μη προγραμματισμένα δρομολόγια, αφού ακολουθούν τη διαδρομή των εκάστοτε μεταφερόμενων φορτίων, λειτουργώντας στην ουσία ως «ταξί εμπορευμάτων». Είναι πρόδηλο πως στην ελεύθερη αγορά ο βαθμός απασχόλησης των πλοίων εξαρτάται αποκλειστικά από τη διαθέσιμη ζήτηση.

Όσον αφορά τη ναυτιλία τακτικών γραμμών (liner shipping), προσφέρει ένα σύνολο τακτικών δρομολογίων με προκαθορισμένο πρόγραμμα και συχνότητα, στο βαθμό που η λειτουργία της προσεγγίζει αυτή των λεωφορειακών γραμμών. Σε αυτή την κατηγορία τα πλοία μεταφέρουν εμπορεύματα μεταξύ συγκεκριμένων λιμένων, ενώ έχουν προκαθοριστεί οι ώρες άφιξης, αναχώρησης καθώς και οι τιμές των ναύλων. Η λειτουργία της πλειοψηφίας των εμπορικών πλοίων στο Αιγαίο πέλαγος υπάγεται στην κατηγορία των τακτικών γραμμών, αφού μεταφέρουν στα νησιά εμπορεύματα (κυρίως αγαθά και ευπαθή προϊόντα) βάσει προκαθορισμένου προγράμματος ακολουθώντας σταθερές διαδρομές.

Βάσει των παραπάνω, το πρόβλημα δρομολόγησης που εξετάζεται στην παρούσα εργασία υπάγεται στην κατηγορία της ναυτιλίας γραμμών (liner shipping) με κύριο χαρακτηριστικό την ύπαρξη μικρών αποστάσεων (short sea shipping). Άλλωστε σύμφωνα με τους Sigurt et al.(2005), η ναυτιλιακή διακίνηση εμπορευματοκιβωτίων εμπύπτει στη λειτουργία των τακτικών γραμμών. Για αυτό το λόγο, καταγράφεται η πρόσφατη επιστημονική έρευνα που αφορά στη ναυτιλία γραμμών, μέσω επισκόπησης ενός συνόλου δημοσιευμένων εργασιών που έχουν ασχοληθεί με τα διάφορα αντικείμενα και παραμέτρους, που αναδύονται από τη συστηματική μελέτη της εν λόγω ναυτιλιακής λειτουργίας.

Σύμφωνα με τους Christiansen et al.(2013), τα πρότυπα σχεδιασμού δικτύων για τη ναυτιλία γραμμών (liner shipping) που έχουν εντοπιστεί στη βιβλιογραφία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- 1) Μοντέλα για μία, απλή, ενιαία διαδρομή των πλοίων (single route) ή ένα σύνολο διαδρομών (set of single routes) χωρίς μεταφόρτωση
- 2) Μοντέλα όπου το κάθε λιμάνι-τροφοδότης (feeder port) συνδέεται με ένα κομβικό (hub) λιμάνι-Τροφοδοτικές γραμμές
- 3) Μοντέλα όπου ορισμένα λιμάνια κατατάσσονται ως κομβικά (hub), χωρίς κανένα περιορισμό στον αριθμό των κομβικών και μη κομβικών λιμένων που ένα πλοίο κατά τη διαδρομή του μπορεί να επισκεφθεί.
- 4) Μοντέλα πολλαπλών διαδρομών χωρίς διαχωρισμό των λιμένων σε κομβικά και μη

1^η Κατηγορία: Μοντέλα για μία, απλή, ενιαία διαδρομή των πλοίων (single route) ή ένα σύνολο διαδρομών (set of single routes) χωρίς μεταφόρτωση

Οι Sambracos *et al.*, το 2004, ασχολήθηκαν με την περίπτωση της μεταφοράς εμπορευμάτων στο Αιγαίο Πέλαγος. Το Αιγαίο πέλαγος παρουσιάζει ιδιομορφίες όσον αφορά την εμπορική ναυτιλία αφενός λόγω της γεωγραφικής ανάπτυξης της ελληνικής ακτογραμμής αφετέρου λόγω της ελλείψεων στις λιμενικές υποδομές των νησιών. Σύμφωνα με τους ερευνητές, στις ελληνικές θαλάσσιες μεταφορές οι διαδρομές των πλοίων καθορίζονται πλήρως από τις επιβατικές μεταφορές, γεγονός που προκαλεί πρόσθετα κόστη και λειτουργικά προβλήματα. Στο πλαίσιο αυτό, οι Sambracos *et. al* εξετάζουν την εισαγωγή των **μικρών εμπορευματοκιβωτίων** (small containers) για την μεταφορά εμπορικών προϊόντων σε ένα δίκτυο νησιών στο Αιγαίο Πέλαγος, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της μεταφοράς εμπορικού φορτίου. Το πρόβλημα (coastal freight shipping problem) αναλύεται σε 2 διαστάσεις: 1) σε επίπεδο στρατηγικού σχεδιασμού, όπου επιδιώκεται ο καθορισμός του μεγέθους του στόλου που απαιτείται για την εκπλήρωση όλων των απαιτήσεων ζήτησης σε ετήσια βάση 2) σε επίπεδο λειτουργικού σχεδιασμού όπου το πρόβλημα αντιμετωπίζεται ως κλασικό πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (vehicle routing problem).

Όσο αφορά το επίπεδο του σχεδιασμού, αρχικά θεωρήθηκε ένα προκαθορισμένο δίκτυο 13 νησιών, με τις συνήθεις πραγματικές θαλάσσιες διαδρομές. Για κάθε νησί έγινε η παραδοχή ότι παρουσιάζει μόνο ζήτηση προϊόντων και όχι προσφορά. Η αντικειμενική συνάρτηση, όπως σε όλα τα παρόμοια προβλήματα CFSP (coastal freight shipping problem), επιδιώκει την ελαχιστοποίηση του κόστους κάτω από ορισμένους περιορισμούς για το ισοζύγιο εξερχόμενων-εισερχόμενων προϊόντων σε κάθε νησί καθώς και περιορισμούς ικανότητας για τα containers και τα πλοία. Το μοντέλο διαμορφώθηκε με τη μέθοδο του **γραμμικού προγραμματισμού** (linear programming). Σε σχέση με τη λειτουργική διάσταση του προβλήματος, το μοντέλο επιλύθηκε και ως πρόβλημα μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού, με τη χρήση **μεθωρετικής μέθοδου**, του αλγόριθμου LBTA (list-based threshold acceptance). Οι ίδιες διαδικασίες επαναλήφθηκαν και για ένα άλλο μεγαλύτερο δίκτυο που περιλαμβάνει όλο το Αιγαίο χωρίς προκαθορισμένες διαδρομές. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων και για τις 2 μεθόδους επίλυσης παρουσιάζει βελτίωση της Α.Σ. κατά 5,1% στο δεύτερο, ευρύτερο δίκτυο. Επίσης, από την ανάλυση ευαισθησίας προέκυψε ότι το συνολικό κόστος μεταφοράς μειώνεται με την αύξηση της μεταφορικής ικανότητας του πλοίου.

Οι Shintani *et al.*(2007) εξέτασαν τη διαμόρφωση ενός δικτύου δρομολόγησης για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, ενσωματώνοντας παράλληλα την επαναδιάταξη των κενών εμπορευματοκιβωτίων μεταξύ των λιμένων της κάθε διαδρομής. Για την επαναδιάταξη των κενών ε/κ αξιοποιείται ο εφεδρικός χώρος των πλοίων. Το πρόβλημα αυτό επιλύθηκε από τους ερευνητές με **ευρετική μέθοδο** και συγκεκριμένα με γενετικό αλγόριθμο, ενώ η εφαρμογή της επίλυσης αφορά τη μεταφορά ε/κ σε 20 νησιά της Νοτιοανατολικής Ασίας.

Στην κατηγορία δρομολόγησης εμπορικών πλοίων με φόρτωση-εκφόρτωση εμπορεύματος και πολλαπλά χρονοπαράθυρα εστίασαν οι Sigurd *et al* (2005). Πιο συγκεκριμένα, επιχείρησαν το σχεδιασμό ενός δικτύου θαλάσσιων μεταφορών μεταξύ λιμένων στη Νορβηγική ακτογραμμή και του κόμβου του Ρότερνταμ, με σκοπό τη δημιουργία ενός οικονομικά αποδοτικού αλλά και χρονικά αξιόπιστου συστήματος μεταφορών, που θα εξυπηρετεί μια σειρά από Νορβηγικές επιχειρήσεις μέσω μεταφοράς εμπορευμάτων από κοινού. Στο πλαίσιο αυτό, ο στόλος θα αποτελείται από νεότευκτα πλοία που θα προσεγγίζουν τα λιμάνια βάσει ενός επαναλαμβανόμενου προγράμματος επισκέψεων ανά περίοδο 2 εβδομάδων. Επίσης, λαμβάνονται υπόψη περιορισμοί που αφορούν στο χρόνο παράδοσης, στον προορισμό των εμπορευμάτων καθώς και στους χρονικούς διαχωρισμούς μεταξύ των λιμένων που προσεγγίζουν τα πλοία. Το μαθηματικό μοντέλο μορφώνεται ως **πρόβλημα διαμερισμού συνόλου** (set partitioning problem) ενώ για την επίλυση του χρησιμοποιήθηκε η ευρεστική μέθοδος **branch and price**.

Στην εργασία των Chuang *et al.*(2010) παρουσιάζεται ένας ασαφής γενετικός αλγόριθμος(fuzzy genetic algorithm) για το σχεδιασμό της διαδρομής των πλοίων μεταφοράς ε/κ στη ναυτιλία γραμμών. Η **θεωρία ασαφών συνόλων** (fuzzy sets theory) χρησιμοποιείται προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της αβεβαιότητας που αφορά στη ζήτηση για μεταφορά containers, όπως αυτή καθορίζεται κάθε στιγμή από την αγορά. Παράλληλα, διαμορφώνεται και **γενετικός αλγόριθμος** για την εύρεση της βέλτιστης δρομολόγησης μέσω της εφαρμογής των γενετικών τελεστών της διασταύρωσης (crossover) και της μετάλλαξης (mutation). Στόχος του αλγόριθμου η εύρεση της βέλτιστης δρομολόγησης, από άποψη κερδοφορίας, λαμβάνοντας όμως υπόψη τη ζήτηση που προκύπτει από την αγορά καθώς τους χρόνους διαδρομής καθώς και τους χρόνους παραβολής των πλοίων στον εκάστοτε λιμένα.

2^η Κατηγορία: Μοντέλα όπου το κάθε λιμάνι (feeder port) συνδέεται με ένα κομβικό(hub) λιμάνι (Μοντέλα τροφοδοτικών γραμμών)

Οι Karlaftis *et al.*(2009) επεκτείνουν το πρόβλημα που έθεσαν οι Sambracos *et al.*(2004), σχετικά με το δίκτυο μεταφοράς μικρών εμπορευματοκιβωτίων στο Αιγαίο Πέλαγος και εξετάζουν τη δρομολόγηση εμπορικών πλοίων με ταυτόχρονη παραλαβή-παραδόση(φόρτωση-εκφόρτωση) σε κάθε λιμένα του δικτύου καθώς και με χρονικούς περιορισμούς στις αφίξεις των πλοίων. Οι χρονικοί περιορισμοί τίθενται λόγω της ευαισθησίας που εκπορεύεται από τη φύση των προϊόντων. Το πρόβλημα διαμορφώνεται ως τροποποιημένο VPR (vehicle routing problem) πρόβλημα βάσει των παραπάνω παραδοχών και με αντικειμενική συνάρτηση η οποία αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους μεταφοράς. Η επίλυση του γίνεται με μεθευρετική μέθοδο και πιο συγκεκριμένα με **γενετικό αλγόριθμο**, όπου εφαρμόζονται οι γενετικοί τελεστές της διασταύρωσης (crossover) και της μετάλλαξης (mutation), για τη δημιουργία νέων λύσεων. Βασικές παραδοχές του προβλήματος που έθεσαν οι συγγραφείς εφαρμόζονται και στην παρούσα εργασία.

Οι Imai *et al.*(2009) συγκρίνουν 2 τυπικά δίκτυα θαλάσσιων διαδρομών ως προς ζητήματα διαχείρισης των containers (καθορισμός μεγέθους στόλου containers και επαναδιάταξη των κενών εμπορευματοκιβωτίων) και διερευνούν κατά πόσο αυτά επιδρούν στην επιλογή του κατάλληλου τύπου δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζουν ένα δίκτυο που απαρτίζεται από ενιαίες διαδρομές προσέγγισης διαδοχικών λιμένων (multi-port-calling network-MPC) το οποίο θα εξυπηρετείται από συμβατικού μεγέθους πλοία και ένα Hub&Spoke δίκτυο(κόμβος με διαδρομές ακτινικής μορφής), με mega-containerships (πλοία με χωρητικότητα που υπερβαίνει τα 10000 TEUs). Αρχικά, διαμορφώθηκαν τα κατάλληλα δίκτυα: το δίκτυο MPC μέσω γενετικών αλγορίθμων ενώ το hub&spoke δίκτυο μέσω της μεθόδου **brute-force** (μέθοδος επίθεσης ωμής βίας). Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος που διατυπώθηκε και στις 2 περιπτώσεις των δικτύων, αφορά στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους της διαχείρισης των containers, που απαρτίζεται από το κόστος κεφαλαίου για τα ιδιόκτητα containers, το κόστος επαναδιάταξης των κενών ε/κ, το κόστος αποθήκευσης τους στα λιμάνια και το κόστος μίσθωσης ε/κ , όπου αυτή είναι απαραίτητη. Από την ανάλυση κόστους, πρόεκυψε ότι το συνολικό κόστος διαχείρισης είναι μικρότερο στα δίκτυα MPC σε σχέση με τα h&s, ειδικότερα όσο αυξάνεται η ανισορροπία

στις ροές εμπορευμάτων μεταξύ των λιμένων, ενώ σε σχέση με τη διαχείριση των κενών ε/κ προέκυψε ότι οι απαιτήσεις επαναδιάταξης για τα h&s δίκτυα είναι σημαντικά μικρότερες.

3^η Κατηγορία: Μοντέλα όπου κάποια λιμάνια κατατάσσονται ως κομβικά χωρίς κανένα περιορισμό στον αριθμό των κομβικών και μη κομβικών λιμένων που ένα πλοίο κατά τη διαδρομή του μπορεί να επισκεφθεί.

Ο σχεδιασμός δικτύου διαδρομών σε συνδυασμό με την ανάθεση στόλου αποτελούν το κύριο αντικείμενο στην ερευνητική εργασία των Reinhardt *et al.* (2007). Το σύνθετο αυτό πρόβλημα προτυποποιείται με τη μέθοδο του **μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού**. Η αντικειμενική συνάρτηση αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους (μεταφοράς και μεταφόρτωσης). Στα μεγάλα δρομολόγια επιτρέπεται η ύπαρξη κάποιων υποδρομολογίων-βρόχων με βάση αναφοράς ένα κοινό λιμάνι, λόγω της αντίστοιχης πρακτικής που εφαρμόζεται στη ναυτιλία γραμμών. Για κάθε πλοίο αντιστοιχεί μόνο μία διαδρομή, η οποία επαναλαμβάνεται καθ'όλη τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού. Οι μεταφορτώσεις στο δίκτυο επιτρέπονται και συνδέονται με το αντίστοιχο κόστος. Βάσει της διαφοροποίησης του κόστους από λιμάνι σε λιμάνι, εντοπίζονται ο βέλτιστος λιμένας για μεταφόρτωση, η επιλογή του οποίου αποτελεί βασικό στοιχείο για τη διαμόρφωση του δικτύου.

4^η Κατηγορία: Μοντέλα πολλαπλών διαδρομών χωρίς διαχωρισμό των λιμένων σε κομβικά και μη

Οι Agarwal και Ergun(2008), παρουσίασαν ένα μοντέλο που επιλύει ταυτόχρονα τόσο το πρόβλημα του προγραμματισμού (ship scheduling) των πλοίων μεταφοράς όσο και το πρόβλημα του σχεδιασμού δικτύου διαδρομών, για μεταφορές μεγάλης κλίμακας. Μία από τις βασικές πιέσεις που λαμβάνεται υπόψη στο μοντέλο είναι η επιβολή απαιτήσεων συχνότητας στον προγραμματισμό των γραμμών. Η μέθοδος που ακολουθείται είναι αυτή του μεικτού ακέραιου προγραμματισμού. Για την επίλυση αναπτύσσονται 3 ευρεστικοί αλγόριθμοι οι οποίοι αξιοποιούν τη διαιρετότητα του αρχικού προβλήματος σε επιμέρους ανεξάρτητα. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ένας «άπληστος» ευρεστικός αλγόριθμος,

ο οποίος επιλέγει τους δυνατούς κύκλους των πλοίων και κατανέμει τα φορτία στις διαδρομές, έναν αλγόριθμο βασισμένο στη **δυναμική δημιουργία μεταβλητών** (column generation-based algorithm) που δημιουργεί επαναληπτικά μια μεγαλύτερη δεξαμενή κερδοφόρων κύκλων σε σχέση με τον προηγούμενο και επιλέγει τους βέλτιστους, καθώς και έναν αλγόριθμο βασισμένο στη Benders decomposition, ο οποίος λόγω του μεγάλου μεγέθους των δεδομένων και των περιορισμών διαχωρίζει το αρχικό πρόβλημα σε ένα κύριο πρόβλημα και σε ένα υποπρόβλημα και ενδείκνυται για την αποδοτική επίλυσή του. Για τον προγραμματισμό των πλοίων χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος επαναληπτικής αναζήτησης. Τα αποτελέσματα του μοντέλου καταδεικνύουν υψηλά ποσοστά πληρότητας στα πλοία και έναν σημαντικό αριθμό μεταφορτώσεων, για εφαρμογή σε παραπάνω από 20 λιμάνια στην Ασία και στη Βόρεια Αμερική και για μέγεθος στόλου 100 πλοίων.

Η από κοινού βελτιστοποίηση της δρομολόγησης των εμπορικών πλοίων και της ανάπτυξης στόλου containerhips αποτέλεσε αντικείμενο έρευνας για τον Alvarez (2009). Το συγκεκριμένο μοντέλο θεωρεί διαφορετικούς τύπους πλοίων αποτυπώνοντας τις διαφοροποιήσεις μεταξύ τους ως προς την κατανάλωση καυσίμου, το καθημερινό λειτουργικό κόστος και την ικανότητα μεταφοράς, επιτρέπει επίσης τη μεταφόρτωση φορτίου, ενώ έχει τη δυνατότητα επιλογής συγκεκριμένης ταχύτητας για κάθε τύπου πλοίου. Το μοντέλο μορφώνεται επί των αρχών του μεικτού ακέραιου προγραμματισμού(MIP), με αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποίησης του συνολικού κόστους μεταφοράς(σταθερό, καύσιμα, penalties σε περίπτωση απόρριψης μεταφοράς και τέλη φόρτωσης-εκφόρτωσης). Αφού κάποιες ακέραιες μεταβλητές σταθεροποιηθούν, το πρόβλημα μετατρέπεται σε MCFP πρόβλημα(multi commodity flow problem) το οποίο επιλύεται με τη βοήθεια αλγόριθμου εσωτερικού σημείου(interior point optimization). Παράλληλα, με τη χρήση της μεθόδου της δυναμικής δημιουργίας μεταβλητών (column generation) παράγονται από το μοντέλο νέες κερδοφόρες διαδρομές. Το μοντέλο εφαρμόστηκε για μια σειρά δεδομένων στο πλαίσιο μίας υπόθεσης εργασίας που περιλαμβάνει 120 λιμένες παγκοσμίως και εξετάστηκε η ευαισθησία της δρομολόγησης και της ανάπτυξης στόλου στις μεταβολές των τιμών των καυσίμων.

Οι Wang και Meng (2013) ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο για τη χάραξη της «διαδρομής εμπορευματοκιβωτίων» (container path), που περιέχει όλες τις πληροφορίες σχετικά με τη μεταφορά των containers μεταξύ των διαφόρων λιμένων σε ένα δίκτυο

διαδρομών. Η μέθοδος του container path χρησιμοποιείται κυρίως σε δίκτυα εμπορευματικών μεταφορών με μεταφορτώσεις. Στο συγκεκριμένο μοντέλο λαμβάνονται υπόψη περιορισμοί σχετικά με το χρόνο μεταφοράς μεταξύ προέλευσης και προορισμού καθώς και περιορισμοί σχετικά με το cabotage. Το μοντέλο διαμορφώνεται βάσει του ακέραίου γραμμικού προγραμματισμού, με αντικειμενική συνάρτηση που ελαχιστοποιεί το κόστος μεταφοράς του ενός container για κάθε ζεύγος προέλευσης-προορισμού. Τα αποτελέσματα από τη χρήση ενός τέτοιου μοντέλου μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τις ναυτιλιακές, τόσο σε επίπεδο τακτικού σχεδιασμού όσο και σε επίπεδο λειτουργικού σχεδιασμού.

Εκτός των παραπάνω 4 κατηγοριών που αφορούν στη μορφή των δικτύων δρομολόγησης, ανήκει η εργασία των Cho and Perakis (1996), οι οποίοι παρουσίασαν ένα στρατηγικό πρόβλημα δρομολόγησης, βάσει του οποίου αναπτύχθηκαν 2 μοντέλα βελτιστοποίησης. Αρχικά, εφάρμοσαν τη μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού για το πρόβλημα της ανάπτυξης στόλου πλοίων μεταφοράς ε/κ (vessel deployment). Το μοντέλο θεωρεί ότι ο αριθμός των διαθέσιμων πλοίων είναι σταθερός καθ'ολη τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού. Από έναν αριθμό υποψήφιων διαδρομών, επιλέγεται το βέλτιστο σύνολο διαδρομών μέσω του προτύπου. Στη δεύτερη περίπτωση, χρησιμοποιείται μεικτός ακέραιος προγραμματισμός (MIP), που εκτός των βέλτιστων διαδρομών και συχνοτήτων εξυπηρέτησης αποτελεί μέσο υποστήριξης για την κάθε ναυτιλιακή εταιρεία κατά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων σχετικά με την επένδυση του κεφαλαίου της σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα.

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά της παραπάνω βιβλιογραφίας, χαρακτηριστικά που αφορούν το αποτέλεσμα της κάθε εργασίας, το σκοπό της αντικειμενικής συνάρτησης καθώς και τη μέθοδο που ακολουθήθηκε:

Πίνακας 2.1 Συνοπτική παρουσίαση της βιβλιογραφίας σχετικά με τη ναυτιλία γραμμών

Εργασία	Ζητούμενο Αποτέλεσμα	Σκοπός αντικειμενικής συναρτησης	Μέθοδος μόρφωσης προτύπου και επίλυσης
Sambracos et al.(2004)	Δρομολόγηση και μέγεθος στόλου	Ελαχιστοποίηση κόστους	Γραμμικός προγραμματισμός+Ευρετικές μέθοδοι
Shintani et al.(2007)	Δρομολόγηση	Μεγιστοποίηση κέρδους	Ευρετική μέθοδος
Karlaftis et al.(2009)	Δρομολόγηση	Ελαχιστοποίηση κόστους	Μεθευρεστική μέθοδος (γενετικός αλγόριθμος)
Sigurd et al.(2005)	Δρομολόγηση	Ελαχιστοποίηση κόστους	Διαμερισμός συνόλου+Ευρεστική μέθοδος (branch and price)
Imai et al.(2009)	Δρομολόγηση και καθορισμός μεγέθους στόλου	Ελαχιστοποίηση συνολικού κόστους	Ευρετικές μέθοδοι
Agarwal και Ergun(2008)	Δρομολόγηση	Μεγιστοποίηση κέρδους	Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός(MIP)+ Ευρετικές μέθοδοι
Chuang et al.(2010)	Δρομολόγηση	Μεγιστοποίηση κέρδους	Μεθευρετική μέθοδος (γενετικός αλγόριθμος)
Reinhardt et al. (2007)	Δρομολόγηση και ανάθεση στόλου	Ελαχιστοποίηση κόστους (μεταφοράς+μεταφόρτωσης)	Μικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός (MIP)
Alvarez (2009)	Δρομολόγηση και ανάπτυξη στόλου	Ελαχιστοποίηση κόστους (σταθερό+καύσιμα+penalties+τέλη φόρτωσης/εκφόρτωσης)	Μικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός και μεθευρετικές μέθοδοι
Cho et Perakis(1996)	Ανάπτυξη στόλου	Μεγιστοποίηση κέρδους	Γραμμικός προγραμματισμός και μικτός ακέραιος προγραμματισμός

Παράλληλα, με την παραπάνω κατάταξη που αφορά στη βιβλιογραφία σχετικά με τη ναυτιλία γραμμών, παρακάτω παρουσιάζεται ακόμη μία κατηγοριοποίηση των ερευνητικών εργασιών βάσει των χαρακτηριστικών ταξινόμησης που διατυπώθηκαν από την Kjeldsen (2012). Τα χαρακτηριστικά αυτά συνδέονται άμεσα με τις παραδοχές του κάθε φορά θεωρούμενου προβλήματος:

- ❖ Αριθμός λιμένων έναρξης μεταφορικής διαδικασίας
- ❖ Τύπος ναυτιλιακής λειτουργίας
- ❖ Τύπος ζήτησης
- ❖ Χρονικοί περιορισμοί στους λιμένες
- ❖ Μεταφόρτωση εμπορεύματος
- ❖ Αριθμός διαδρομών για κάθε πλοίο

Η νέα αυτή κατηγοριοποίηση συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2.2. Κατηγοριοποίηση βιβλιογραφίας σύμφωνα με τα κριτήρια της Kjeldsen (2012)

Εργασία	Λιμάνια έναρξης μεταφοράς	Τύπος ναυτιλιακής λειτουργίας	Ζήτηση	Χρονικοί περιορισμοί στους λιμένες	Μεταφόρτωση εμπορεύματος	Αριθμός διαδρομών για κάθε πλοίο
Sambracos et al.(2004)	Ένα	Επίδοση	Ντετερμινιστική	Χωρίς περιορισμούς	Επιτρέπεται	-
Shintani et al.(2007)	Ένα	Μικτή παραλαβή και επίδοση	Ντετερμινιστική	Χωρίς περιορισμούς	Δεν επιτρέπεται	Πολλαπλές διαδρομές
Karlaftis et al.(2009)	Ένα	Μικτή παραλαβή και επίδοση	Ντετερμινιστική	Μέγιστος χρόνος διαδρομής	Δεν επιτρέπεται	Μία διαδρομή
Sigurd et al.(2005)	Ένα	Μικτή παραλαβή και επίδοση	Ντετερμινιστική	Χρονοπαράθυρα	Δεν επιτρέπεται	Μία διαδρομή
Imai et al.(2009)	Ένα	Μικτή παραλαβή και επίδοση	Ντετερμινιστική	Χωρίς περιορισμούς	Δεν επιτρέπεται	Μία διαδρομή
Agarwal και Ergun(2008),	Πολλαπλά	Μικτή παραλαβή και επίδοση	Ντετερμινιστική	Χρονοπαράθυρα	Επιτρέπεται	Μία διαδρομή
Chuang et al.(2010)	Ένα	Διακριτή παραλαβή και επίδοση	Στοχαστική	Χωρίς περιορισμούς	Δεν επιτρέπεται	Μία διαδρομή
Reinhardt et al. (2007)	Ένα	-	Ντετερμινιστική	Χωρίς περιορισμούς	Επιτρέπεται	Μία διαδρομή
Alvarez (2009)	Πολλαπλά	Μικτή παραλαβή και επίδοση	Ντετερμινιστική	Χωρίς περιορισμούς	Επιτρέπεται	Μία διαδρομή
Cho et Perakis(1996)	Ένα	Μικτή παραλαβή και επίδοση	Ντετερμινιστική	Χωρίς περιορισμούς	Δεν επιτρέπεται	Πολλαπλές διαδρομές

2.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση στοχαστικού προβλήματος δρομολόγησης

Όπως επισημάνθηκε και στο Κεφάλαιο 1, στην υπό εξέταση δρομολόγηση λαμβάνονται υπόψη οι χρόνοι διαδρομής στοχαστικά, συνεπώς εμπίπτει στη γενικότερη κατηγορία των στοχαστικών προβλημάτων δρομολόγησης. Το γενικότερο στοχαστικό πρόβλημα δρομολόγησης εμφανίζεται σε 5 μορφές, ανάλογα με το είδος της στοχαστικής παραμέτρου: δρομολόγηση με στοχαστική ζήτηση, δρομολόγηση με στοχαστικούς πελάτες, δρομολόγηση με στοχαστικούς χρόνους διαδρομής, δρομολόγηση με στοχαστικούς χρόνους εξυπηρέτησης, δυναμικό στοχαστικό πρόβλημα.

Στην κατεύθυνση του προβλήματος δρομολόγησης με στοχαστικούς χρόνους διαδρομής, έχουν εκπονηθεί διάφορες εργασίες, στις οποίες οι παράμετροι της στοχαστικότητας διαφοροποιούνται. Οι Lambert et al. (1993) και Laporte et al. (1992) ασχολήθηκαν με το πρόβλημα του πλανώδιου πωλητή με στοχαστικούς χρόνους διαδρομής. Οι Lambert et al. (1993) αποσκοπούσαν στο σχεδιασμό ενός δικτύου συλλογής χρημάτων από τράπεζες, όπου οι χρόνοι διαδρομής μεταξύ των θεωρούμενων τραπεζικών υποκαταστημάτων λήφθηκαν ως στοχαστικοί. Για αυτό το λόγο, το πρότυπο του προβλήματος διαμόρφωθηκε βάσει των αρχών του ακέραιου προγραμματισμού ενώ για τη επίλυση του αναπτύχθηκε ευρετικός αλγόριθμος. Αντίστοιχα, στην περίπτωση των Laporte et al. (1992), προτάθηκε ένα διπλό πρότυπο δρομολόγησης που βασίζεται στην τεχνική των τυχαίως μεταβαλλόμενων περιορισμών (chance constrained programming) αλλά και σε ένα πρότυπο ελέγχου των καθυστερήσεων, όπου μέσω μίας συνάρτησης επιβολής «ποινών», προκαθορίζεται το ύψος του χρόνου καθυστέρησης. Οι Li et al. (2010) εξέτασαν ένα πρόβλημα δρομολόγησης με στοχαστικούς χρόνους διαδρομής και εξυπηρέτησης, θέτοντας χρονοπαράθυρα στη λειτουργία των οχημάτων. Το πρότυπο μορφώθηκε με διττό τρόπο, με την τεχνική των μεταβαλλόμενων περιορισμών καθώς και μέσω του λεγόμενου μηχανισμού «διεξόδου». Για την επίλυση των 2 μοντέλων χρησιμοποιήθηκε ευρετικός αλγόριθμος, βασισμένος στην αναζήτηση tabu (tabu search). Τεχνική CCP χρησιμοποιήθηκε και από τους Zhang et al. (2012), οι οποίοι εξέτασαν τη δρομολόγηση ενός στόλου οχημάτων της εφοδιαστικής αλυσίδας με στοχαστικούς χρόνους διαδρομής και ταυτόχρονη παραλαβή και παράδοση εμπορευμάτων στους πελάτες του δικτύου. Παράλληλα, αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος διασκορπισμένης αναζήτησης (scatter search), για την επίλυση του

προτεινόμενου προβλήματος. Αντίθετα με τους προηγούμενους, οι Ζηλιασκόπουλος και Χρυσόχου (2012), πρότειναν έναν αλγόριθμο on-line δρομολόγησης, ενός είδους διαδραστικής δρομολόγησης όπου οι πληροφορίες του συστήματος αποκαλύπτονται στιγμιαία και σταδιακά στη διάρκεια εξέλιξής του, χρησιμοποιώντας την έτερη τεχνική του στοχαστικού προγραμματισμού, μέσω του μηχανισμού “recourse”.

2.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση για την ανάλυση των ανεμολογικών δεδομένων στο Αιγαίο πέλαγος

Σχετικά με την ανάλυση των ανεμολογικών μετρήσεων στο Αιγαίο πέλαγος και τη στατιστική επεξεργασία τους έχει εκπονηθεί ένα σύνολο ερευνητικών εργασιών, που κυρίως εστιάζει στην εκτίμηση του αιολικού δυναμικού της εκάστοτε θεωρούμενης περιοχής και στην αξιολόγηση της καταλληλότητάς του για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών. Από αυτές τις εργασίες, το ενδιαφέρον συγκεντρώνεται στα στατιστικά μοντέλα, τα οποία περιγράφουν το αιολικό πρότυπο των διαφόρων περιοχών του Αιγαίου. Ο Καλδέλλης (2005), στο σύγγραμμα του με τίτλο «Διαχείριση της Αιολικής Ενέργειας» και συγκεκριμένα στο κεφάλαιο περί επεξεργασίας και αξιολόγησης του αιολικού δυναμικού αναφέρει πως οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες αναλυτικές κατανομές πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου είναι η κατανομή «Weibull» και η κατανομή «Rayleigh». Οι Lalas et al. (1983) παρέχουν μια συνολική ανάλυση του αιολικού δυναμικού στην Ελλάδα, στο πλαίσιο της οποίας προχώρησαν σε απεικόνιση της γεωγραφικής διασποράς των παραμέτρων της κατανομής Weibull, όπως αυτή προέκυψε από τα αποτελέσματα της εργασίας τους. Σε ευρύτερο γεωγραφικό επίπεδο, οι Lavagnini et al. (2005) εξέτασαν τη λεκάνη της Μεσογείου και υπολόγισαν τις μέσες ταχύτητες του ανέμου καθώς και τις παραμέτρους της κατανομής Weibull σύμφωνα με τη μεθοδολογία του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Καιρικών Προγνώσεων (ECMWF). Μάλιστα, συνέκριναν τα αποτελέσματα της εφαρμογής τους με πειραματικά δεδομένα από μετρήσεις σε νησιά και σε ανεμολογικούς σταθμούς. Οι Bagiorgas et al. (2012) χρησιμοποιούν δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου από 10 σταθμούς στο Ιόνιο και στο Αιγαίο πέλαγος προκειμένου να κατανοήσουν τα χαρακτηριστικά του ανέμου και την τάση των διακυμάνσεων που εμφανίζει η ταχύτητα του ανέμου από περιοχή σε περιοχή. Για τη στατιστική έκφραση της ταχύτητας θεωρούν ως καταλληλότερη την κατανομή Weibull, οι

παράμετροι της οποίας προσδιορίζονται με τρεις διαφορετικές μεθόδους. Τη μέθοδο Weibull υιοθετούν και οι Vogiatzis et al. (2004), οι οποίοι θέτουν ως περιοχή μελέτης του ανεμολογικού προφίλ το Βόρειο Αιγαίο. Αντίστοιχα και οι Fyrripis et al. (2008), διερευνούν το αιολικό δυναμικό στο Κεντρικό Αιγαίο και πιο συγκεκριμένα στο νησί της Νάξου. Μάλιστα, βάσει ανεμολογικών μετρήσεων προχώρησαν σε συγκριτική ανάλυση των κατανομών Weibull και Rayleigh, καταλήγοντας στο συμπέρασμα πως η πρώτη ταιριάζει περισσότερο στο προφίλ της περιοχής.

Επιχειρώντας μία γενικότερη προσέγγιση της παραπάνω βιβλιογραφίας, και ειδικά των εργασιών που επικεντρώνονται στο σχεδιασμό δικτύου και στη βελτιστοποίηση της δρομολόγησης, παρατηρείται ότι, κατά κύριο λόγο, ο χρόνος διαδρομής του πλοίου (χρόνος πλεύσης στη θάλασσα) προσδιορίζεται ντετερμινιστικά, χωρίς πρόβλεψη των διακυμάνσεων που επαγωγικά προκαλούν μεταβολές του αρχικού προγραμματισμού και ενδεχόμενη απώλεια της αξιοπιστίας στη μεταφορά. Στο πλαίσιο αυτό, οι Wang & Meng (2012) λαμβάνουν υπόψη την αβεβαιότητα που συνοδεύει τους χρόνους διαδρομής, υπολογίζοντας το χρόνο που απαιτείται για την αντιμετώπιση οποιούδηποτε απρόοπτου γεγονότος επί θαλάσσης (π.χ. καιρικές συνθήκες) σε κάθε τμήμα της διαδρομής του πλοίου. Παράλληλα, ενσωματώνουν και την αβεβαιότητα στο χρόνο επί του λιμένα και θεωρούν το συνολικό διαθέσιμο χρόνο για την εκτέλεση κάθε διαδρομής ως τυχαία μεταβλητή. Στην παρούσα εργασία, το μοντέλο δρομολόγησης που υιοθετείται επιχειρεί να «εγκιβωτίσει» αυτή τη χρονική αβεβαιότητα, εκτιμώντας όμως την επίδραση των καιρικών συνθηκών στην ταχύτητα του πλοίου και συνεπώς στο χρόνο διαδρομής, μέσα από την ανάλυση των ανεμολογικών δεδομένων στην περιοχή του Αιγαίου. Διαμορφώνεται, δηλαδή, ένα στοχαστικό πρόβλημα, που υπόκειται σε πραγματικούς περιορισμούς της ναυτιλιακής πρακτικής και αποσκοπεί, σε λειτουργικό επίπεδο, στην κατά το δυνατό βελτίωση της αξιοπιστίας των θαλάσσιων μεταφορικών υπηρεσιών.

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ

Στο παρόν κεφάλαιο, ορίζεται ακριβώς το υπό διερεύνηση πρόβλημα δρομολόγησης επεκτείνοντας τη βάση των παραδοχών που έθεσαν οι Sambracos et al. (2004) και Karlaftis et al. (2009). Περιγράφονται οι περιορισμοί που λαμβάνονται υπόψη κατά τη μόρφωση του προβλήματος ενώ αναπτύσσεται και το μαθηματικό του μοντέλο, κατά τα πρότυπα ενός προβλήματος δρομολόγησης με στοχαστικούς χρόνους διαδρομής, ταυτόχρονη παραλαβή και επίδοση εμπορευμάτων και χρονικούς περιορισμούς. (STT-VRPSPDTD)

3.1 Ερευνητικό υπόβαθρο για τη δρομολόγηση στο Αιγαίο πέλαγος

Όπως έχει επισημανθεί, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας επιχειρείται ο σχεδιασμός ενός δικτύου δρομολόγησης στο Αιγαίο πέλαγος, λαμβάνοντας υποψηφίες τις πραγματικές συνθήκες που εμφανίζονται σήμερα στην ελληνική εμπορική ναυτιλία. Το πρόβλημα της δρομολόγησης, γενικά, έγκειται στον καθορισμό της ακολουθίας φορτοεκφορτώσεων που πρέπει να ακολουθήσει κάθε πλοίο, ώστε η μεταφορά να γίνει με το μικρότερο δυνατό κόστος για το σύνολο των φορτίων. Με βάση τα χαρακτηριστικά και το στόχο του προβλήματος δρομολόγησης πλοίων, αλλά και δεδομένων των περιοδικών αναγκών των νησιωτικών περιοχών για εμπορευματική μεταφορά, μπορεί να θεωρηθεί ότι ανήκει στην κλασική κατηγορία προβλημάτων δρομολόγησης στόλου οχημάτων (**Vehicle routing problem**). Στο πρόβλημα δρομολόγησης επιδιώκεται ο προσδιορισμός των βέλτιστων δρομολογίων στόλου οχημάτων για τη μεταφορά αγαθών από την κεντρική αποθήκη (depot) στις τοποθεσίες των πελατών (customers). Το πρόβλημα δρομολόγησης προτάθηκε από τους Dantzig και Ramser (1959), οι οποίοι προτυποποίησαν και επίλυσαν το πρόβλημα μεταφοράς καυσίμων. Αντικειμενικός σκοπός του προβλήματος είναι ο προσδιορισμός της συντομότερης διαδρομής που πρέπει να ακολουθήσουν τα βυτιοφόρα φορτηγά εκκινώντας από το κεντρικό διυλιστήριο και επισκεπτόμενα τα πρατήρια καυσίμων.

Βέβαια, το πρόβλημα δρομολόγησης πλοίων παρουσιάζει ορισμένες ιδιαιτερότητες σε σχέση με το κλασικό πρόβλημα δρομολόγησης, ιδιαιτερότητες που σχετίζονται με:

- ❖ Το χρονικό διάστημα για το οποίο πραγματοποιείται η δρομολόγηση
- ❖ Την ομοιομορφία των πλοίων του στόλου
- ❖ Την αυξημένη εξάρτηση από τις καιρικές συνθήκες που προκαλεί συχνά ανατροπή του ακριβούς προγραμματισμού
- ❖ Το κόστος λειτουργίας του πλοίου που επιπρόσθετα εξαρτάται και από τα λιμάνια που αυτό επισκέπτεται
- ❖ Επιπρόσθετους περιορισμούς, όπως η συμβατότητα του πλοίου με τα λιμάνια φορτοεκφόρτωσης καθώς και το είδος των φορτίων που τοποθετούνται στα διαμερίσματα του πλοίου

Στο υπό εξέταση πρόβλημα, θεωρείται ότι ο σχεδιασμός του δικτύου δρομολόγησης αφορά ομοιογενή στόλο πλοίων και πιο συγκεκριμένα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (containerships), με ομοιόμορφα χαρακτηριστικά μεταφορικής ικανότητας και κοινό κόστος λειτουργίας. Οι Sambracos et al.(2004) μόρφωσαν, για πρώτη φορά στο Αιγαίο πελάγος, ένα πρόβλημα δρομολόγησης ομοιογενούς στόλου οχημάτων (πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων), με κύριο χαρακτηριστικό την καθορισμένη μεταφορική ικανότητα τους (capacitated vehicle routing problem). Σύμφωνα με τις παραδοχές του προβλήματος, ο στόλος αυτός έχοντας ως βάση ένα κεντρικό λιμάνι (depot) εξυπηρετεί έναν αριθμό νησιών (πελάτες), παραδίδοντας προκαθορισμένες ποσότητες εμπορευμάτων και επιδιώκοντας αφενός το ελάχιστο δυνατό κόστος μεταφοράς, όπως δηλαδή συμβαίνει και στο κλασικό πρόβλημα δρομολόγησης στόλου οχημάτων, αφετέρου τη μη υπέρβαση των ορίων χωρητικότητας του κάθε πλοίου. Στην εργασία αυτή, όπως περιγράφηκε και στο Κεφάλαιο 2, θεωρείται ότι οι λιμένες του δικτύου παρουσιάζουν μόνο ζήτηση εμπορευμάτων ενώ το κεντρικό λιμάνι χαρακτηρίζεται από προσφορά ίση με τη συνολική ζήτηση των υπόλοιπων λιμένων και μηδενική ζήτηση προϊόντων.

Στην πραγματικότητα, όμως, καταγράφονται χρονικές περίοδοι κατά τη διάρκεια του έτους που οι νησιωτικοί λιμένες παρουσιάζουν αξιόλογη προσφορά εμπορευμάτων, ποσοτικά συγκρίσιμη με τη ζήτηση, γεγονός που καταδεικνύει την ανάγκη για εποχιακό επανασχεδιασμό των διαδρομών (Sambracos, 2000). Στην κατεύθυνση αυτή, οι Karlaftis et al. (2009), επεκτείνοντας το αρχικό πρόβλημα που τέθηκε παραπάνω, θεώρησαν πρόσθετες παραμέτρους για το δίκτυο δρομολόγησης στο Αιγαίο, παράμετροι όπως η ταυτόχρονη παραλαβή και παράδοση εμπορευμάτων (simultaneous pick-ups and deliveries) στα νησιά

καθώς και τα χρονικά περιθώρια ολοκλήρωσης των διαδρομών (time deadlines). Στην περίπτωση αυτή τα νησιά χαρακτηρίζονται στο δίκτυο, όχι μόνο βάσει της ζήτησης εμπορευμάτων, αλλά και βάσει της προσφοράς τους σε κάποια χρονική βάση, ενώ γίνεται παραδεκτό ότι τα πλοία του ομοιογενούς στόλου έχουν τη δυνατότητα να προσεγγίζουν τους νησιωτικούς λιμένες επιτελώντας παράλληλα και τις λειτουργίες της παραλαβής και της διανομής προϊόντων. Εξυπακούεται ότι οι τεχνικές δυνατότητες των εκάστοτε λιμενικών εγκαταστάσεων επιτρέπουν τις παραπάνω διαδικασίες. Βάσει των παραπάνω, μορφώθηκε ένα παραλλαγμένο πρόβλημα δρομολόγησης πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, με ταυτόχρονη παραλαβή και επίδοση εμπορευμάτων και χρονικούς περιορισμούς (vehicle routing problem with simultaneous deliveries and pick-ups and time deadlines-VRPSPDTD).

3.2 Προτεινόμενες επεκτάσεις του προβλήματος δρομολόγησης

Βασική παραδοχή των περιγραφέντων προβλημάτων αποτελεί ο ντετερμινιστικός χαρακτήρας των χρόνων διαδρομής. Οι χρόνοι ταξιδιού μεταξύ των κόμβων του δικτύου(νησιά και κεντρικός λιμένας) θεωρούνται σταθεροί και ανεξάρτητοι από οποιονδήποτε περιοριστικό παράγοντα, ο προσδιορισμός τους δε, βασίζεται αποκλειστικά στις αποστάσεις μεταξύ των κόμβων καθώς και στην προκαθορισμένη ταχύτητα λειτουργίας. Σε πραγματικές συνθήκες, όμως, υπεισέρχονται διάφοροι παράγοντες οι οποίοι δύνανται να επηρεάσουν αισθητά το χρόνο διαδρομής ή το χρόνο εξυπηρέτησης του πλοίου επί του λιμένα, καθιστώντας τα μεγέθη αβέβαια. Η αβεβαιότητα αυτή του χρόνου διαδρομής ή/και του χρόνου εξυπηρέτησης επιδρά συνολικά στη δρομολόγηση, προκαλώντας κυλιόμενες καθυστερήσεις στην εκπλήρωση του μεταφορικού έργου και εν τέλει σημαντική αύξηση του κόστους μεταφοράς (Noteboom & Rodrigue, 2008). Τέτοιοι παράγοντες που συντελούν στην αβέβαιότητα των χρόνων διαδρομής και εξυπηρέτησης μπορεί να είναι απρόβλεπτοι, όπως κάποια μηχανική βλάβη στο πλοίο ή κάποιο τυχαίο γεγονός στη λιμενική εγκατάσταση καθώς και αναμενόμενοι όπως συνθήκες αυξημένης κίνησης στις θέσεις παραβολής των λιμενικών εγκαταστάσεων (Verminnen et al., 2007). Αν και σύμφωνα με το Noteboom (2006), η μειωμένη αξιοπιστία των δρομολογίων αποδίδεται πρωτίστως στη λιμενική συμφόρηση, δε μπορεί να θεωρηθεί το ίδιο και για την περιοχή μελέτης του προβλήματος όπου η λιμενική ικανότητα των νησιών σπανίως υπερκαλύπτεται

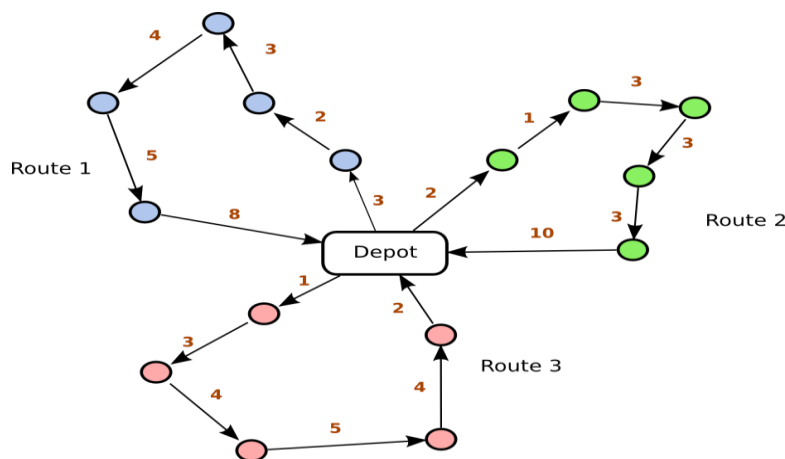
από τη ζήτηση (Karlaftis et al., 2009). Ως εκ τούτου, η βασική αιτία, που προκαλεί μεταβολή στους χρόνους διαδρομής, κατά κύριο λόγο στην ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου πελάγους, συνοψίζεται στην επίδραση των καιρικών συνθηκών.

Στην περίπτωση του Αιγαίου πελάγους, το πρόβλημα της δρομολόγησης των εμπορικών πλοίων, από άποψη λειτουργικού σχεδιασμού, μπορεί να συμπεριλάβει και την αβεβαιότητα των χρόνων διαδρομής λόγω των καιρικών συνθηκών. Οι άνεμοι που πνέουν στο πέλαγος επηρεάζουν βαθμιαία την ταχύτητα λειτουργίας του πλοίου και κατ'έπекταση και το χρόνο διαδρομής από κόμβο σε κόμβο του δικτύου δρομολόγησης (The American Practical Navigator, 2002). Στις επιδράσεις των ανέμων συγκαταλαμβάνεται και ο χρόνος φορτοεκφόρτωσης των πλοίων επί των λιμενικών εγκαταστάσεων, μιας και αυξάνεται η δυσκολία προσέγγισης του λιμένα καθώς και απαιτούνται περισσότεροι χειρισμοί επί του κρηπιδώματος. Με υπόβαθρο τις δύο εργασίες που ασχολήθηκαν με τη δρομολόγηση στο Αιγαίο και λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω παραδοχές, εξετάζεται ένα εξελιγμένο πρόβλημα δρομολόγησης ενός ομοιόμορφου στόλου πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, για τον οποίο, επιπρόσθετα, εισάγονται οι χρόνοι διαδρομής ως στοχαστικές και όχι ως ντετερμινιστικές μεταβλητές. Πιο αναλυτικά, στο πρόβλημα που διαμορφώνεται οι περιορισμοί που υπεισέρχονται, τίθενται ως εξής:

- 1) Κάθε διαδρομή πλοίου ξεκινά από το κεντρικό λιμάνι (hub) και καταλήγει στο ίδιο. Στο υπό εξέταση δίκτυο ως κεντρικό λιμάνι θεωρείται ο εμπορευματικός λιμένας του Πειραιά.
- 2) Σε κάθε νησί του δικτύου πραγματοποιείται παράλληλα παραλαβή και επίδοση εμπορευμάτων. Όπως προαναφέρθηκε, σε εποχιακό επίπεδο, ορισμένα νησιά παρουσιάζουν σημαντική προσφορά προϊόντων, τα οποία στη συνέχεια διακινούνται στην ενδοχώρα. Στην ουσία, πρόκειται για τοπική παραγωγή του πρωτογενούς και δευτερογενούς τομέα νησιών με σημαντική οικονομική δραστηριότητα όπως η Κρήτη και τα μεγαλύτερα νησιά του Ανατολικού και Νοτίου Αιγαίου (Sambracos et al., 2004).
- 3) Το ισοζύγιο ζήτησης-προσφοράς εμπορευμάτων σε κάθε κόμβο του δικτύου, αλλά και συνολικά σε κάθε διαδρομή δε μπορεί να υπερβεί τη συνολική χωρητικότητα του πλοίου.

- 4) Κάθε κόμβος του δικτύου εξυπηρετείται μόνο μία φορά, από πλοίο του ομοιογενούς στόλου με προκαθορισμένη χωρητικότητα.
- 5) Καθιερώνεται μέγιστο χρονικό περιθώριο στην άφιξη του πλοίου, μιας και η άφιξή του στο εκάστοτε λιμάνι προορισμού δεν μπορεί να υπερβεί μία προκαθορισμένη προθεσμία από την έναρξη του ταξιδιού. Αυτό οφείλεται στη φύση των μεταφερόμενων προϊόντων, η οποία δεν επιτρέπει την σημαντική παράταση της παράδοσής τους στο σημείο προορισμού. Επειδή συνήθως η μεταφορά αφορά ευπαθή προϊόντα, με αυστηρές ημερομηνίες λήξης (γαλακτοκομικά προϊόντα, φρέσκα λαχανικά, προϊόντα αλιείας και κτηνοτροφίας), υιοθετούνται χρονικοί περιορισμοί ώστε να μη διακινδυνεύεται ενδεχόμενο απαξίωσής τους. Παρόλο που δε θεσπίζονται χρονοπαράθυρα για τη βέλτιστη χρήση των θέσεων παραβολής, δεν υπάρχει πρόβλημα με τη χωρητικότητα των νησιωτικών λιμένων, δεδομένου του χαμηλού βαθμού χρήσης τους.
- 6) Οι χρόνοι φορτοεκφορτώσεων σε κάθε κόμβο του δικτύου λαμβάνονται υπόψη ως σταθεροί.

Στο περίγραμμα των παραδοχών που αναλύθηκαν, το πρόβλημα ανάγεται στην κατηγορία των προβλημάτων δρομολόγησης με ταυτόχρονη παραλαβή και διανομή, με χρονικούς περιορισμούς και στοχαστικούς χρόνους διαδρομής (stochastic travel time vehicle routing problem with simultaneous deliveries and pick-ups and time deadlines). Στόχος του εν λόγω προβλήματος αποτελεί η ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου αριθμού διαδρομών καθώς και κατ'επέκταση η ελαχιστοποίηση του αντίστοιχου συνολικού κόστους μεταφοράς. Σχηματικά, το δίκτυο δρομολόγησης μπορεί να θεωρηθεί ότι λαμβάνει την εξής μορφή:



Σχήμα 3.1 Γενική άποψη της μορφής του δικτύου δρομολόγησης

Οι κόμβοι του δικτύου αντικατοπτρίζουν τους νησιωτικούς λιμένες που συμπεριλαμβάνονται σε κάθε διαδρομή και οι οποίοι χαρακτηρίζονται και από την προσφορά και από τη ζήτηση, ενώ τα βέλη υποδηλώνουν τη θαλάσσια διαδρομή μεταξύ 2 κόμβων, η οποία περιγράφεται αφενός από την απόσταση σε ναυτικά μίλια αφετέρου από τη στοχαστική μεταβλητή του χρόνου διαδρομής. Οι χρόνοι διαδρομής είναι συνεχείς ή διακριτές τυχαίες μεταβλητές, καθεμία εκ των οποίων ακολουθεί ορισμένη κατανομή πιθανότητας, όπως για παράδειγμα είναι η ομοιόμορφη κατανομή ή η κανονική κατανομή (X.Li et al., 2010). Στην παρούσα εργασία, οι χρόνοι διαδρομής ανά ζεύγος προέλευσης-προορισμού δεν ακολουθούν ούτε σταθερή αλλά ούτε κάποια γνωστή κατανομή, δεδομένης της πολύπλοκης επίδρασης των καιρικών συνθηκών στον καθορισμό του χρόνου διαδρομής. Βέβαια, στο πλαίσιο διερεύνησης του εν λόγω προβλήματος επιχειρείται ένας προσεγγιστικός προσδιορισμός της επίδρασης του καιρού στην απόδοση του πλοίου και επακολούθως η εξαγωγή της συνεπαγόμενης κατανομής του χρόνου ταξιδιού για κάθε πιθανό ζεύγος κόμβων.

Παρόλο που το στοχαστικό πρόβλημα που περιγράφηκε ανωτέρω παρουσιάζει πρακτικά οφέλη, δεδομένων των προϋποθέσεων που τέθηκαν, δεν παύει να αποτελεί ένα πολύπλοκο και δύσκολο ζήτημα, τόσο ως προς τη μοντελοποίησή του όσο και ως προς την επίλυσή του (Zhang et al., 2012). Για παράδειγμα, επειδή στους νησιωτικούς λιμένες απαιτείται ταυτόχρονη παραλαβή και επίδοση εμπορευμάτων, το συνολικό φορτίο του πλοίου διαφοροποιείται συχνά και σε μεγάλο βαθμό. Επίσης, αρκετά ζητήματα εκπορεύονται από τον καθορισμό του μέγιστου χρονικού περιθωρίου άφιξης. Λόγω της στοχαστικότητας των χρόνων διαδρομής, στην περίπτωση που ο χρόνος ταξιδιού προσεγγίσει τον προκαθορισμένο χρονικό περιορισμό χωρίς να έχει ολοκληρωθεί το μεταφορικό έργο, το πλοίο πρέπει να επιστρέψει στον κεντρικό λιμένα ακόμα και εάν έχει τη δυνατότητα χώρου να εξυπηρετήσει τα νησιά που δεν επισκέφθηκε. Τέτοια κρίσιμα σημεία επιβάλλουν ισχυρούς περιορισμούς, οι οποίοι δυσχεραίνουν την επίλυση του προβλήματος και αυξάνουν το συνολικό χρόνο της δρομολόγησης.

Η διερεύνηση των παραμέτρων αυτών καθώς και των κριτηρίων του προβλήματος που τέθηκαν, οδηγούν στην κατάρτιση ενός μοντέλου στο ευρύτερο πλαίσιο του στοχαστικού προγραμματισμού, το οποίο θα καθορίζει τις βέλτιστες διαδρομές των πλοίων καθώς και τον απαιτούμενο αριθμό πλοίων για την επίτευξη της διαδικασίας δρομολόγησης. Στη

βιβλιογραφία, το πεδίο της στοχαστικής δρομολόγησης συνήθως μοντελοποιείται είτε με την τεχνική Προγραμματισμού μεταβαλλόμενων περιορισμών (Chance Constrained Programming) είτε με στοχαστικό προγραμματισμό μέσω του λεγόμενου μηχανισμού “διεξόδου” (Stochastic Programming with recourse). Τα μοντέλα με μηχανισμό διεξόδου, διαχωρίζουν το πρόβλημα σε δύο φάσεις: στόχος είναι να καθοριστεί η λύση της πρώτης φάσης (a priori solution) η οποία ελαχιστοποιεί το αναμενόμενο κόστος της λύσης της δεύτερης φάσης (Χρυσόχου και Ζηλιασκόπουλος, 2012). Στην ουσία, η δεύτερη φάση αποτελεί διορθωτική κίνηση της λύσης της πρώτης φάσης (recourse policy).

Όσον αφορά στο υπό εξέταση πρόβλημα, δομείται ένα μοντέλο CCP, όπου ορισμένοι από τους περιορισμούς έχουν προκαθορισμένη πιθανότητα επιτυχίας, προκειμένου το δυναμικά μεταβαλλόμενο πρόβλημα να τροποποιηθεί σε στατικό και να είναι δυνατή η ταχύτερη και απλούστερη επίλυσή του, με τις γνωστές μεθόδους.

3.3 Διαμόρφωση του μαθηματικού προτύπου του προβλήματος

Το στοχαστικό πρόβλημα δρομολόγησης, χωρίς βλάβη της γενικότητας, θεωρείται ότι καθορίζεται από ένα γράφο $G = (V, A)$ όπου $V = \{0, 1, 2, \dots, n\}$ είναι το σύνολο των κόμβων που αντιπροσωπεύουν τα νησιά και A το σύνολο των ακμών που συνδέουν τους κόμβους. Ο κόμβος 0 αντικατοπτρίζει τον κεντρικό λιμένα.

Η μαθηματική προτυποποίηση του προβλήματος STT-VRPSPDTD διαμορφώνεται ως εξής:

$$\min \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} \sum_{k \in W} (c_{ij} \cdot x_{ijk}) \quad (3.1)$$

όπου $x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{αν το πλοίο } k \text{ χρησιμοποιεί την ακμή } (i, j) \\ 0, & \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases}$

με περιορισμούς:

$$\sum_{i \in C} \sum_{k \in W} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in C \quad (3.2)$$

$$\sum_{j \in C} \sum_{k \in W} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in C \quad (3.3)$$

$$\sum_{i \in C} x_{ipk} = \sum_{j \in C} x_{pjk} \quad \forall p \in C, k \in W \quad (3.4)$$

$$\sum_{i \in C} d_i \left(\sum_{j \in C} x_{ijk} \right) \leq Q_k \quad \forall k \in W \quad (3.5)$$

$$\sum_{i \in C} s_{ik} \sum_{j \in C} x_{ijk} + \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} t_{ijk} \cdot x_{ijk} \leq T_k \quad \forall k \in W \quad (3.6)$$

$$P \left(\sum_{i \in C} \sum_{j \in C} t_{ijk} \leq T_k \right) \geq a \quad \forall k \in W \quad (3.7)$$

$$\sum_{j \in C/\{0\}} x_{0jk} \leq 1 \quad \forall k \in W \quad (3.8)$$

$$\sum_{i \in C/\{0\}} x_{i0k} \leq 1 \quad \forall k \in W \quad (3.9)$$

$$x_{ijk} \in S \quad \forall i \in C, j \in C, k \in W \quad (3.10)$$

$$S = \left\{ x_{ijk} : \sum_{i \in B} \sum_{j \in B} x_{ijk} \leq |B| - 1 \quad \forall B \subseteq C/\{0\}; |B| \geq 2 \right\} \quad (3.11)$$

$$a_j \geq a_i + s_{ik} + t_{ijk} - (1 - x_{ijk}) \cdot T_k \quad \forall i, j \in C, k \in W \quad (3.12)$$

$$a_j \geq a_i + s_{ik} + t_{ijk} + (1 - x_{ijk}) \cdot T_k \quad \forall i, j \in C, k \in W \quad (3.13)$$

$$a_0 = 0 \quad (3.14)$$

$$a_j \leq l_j \quad \forall j \in C \quad (3.15)$$

$$l_{0k} = \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} d_j \cdot x_{ijk} \quad \forall k \in W \quad (3.16)$$

$$l_{jk} \geq l_{0k} - d_j + p_j - M \cdot (1 - x_{0jk}) \quad \forall j \in C, k \in W \quad (3.17)$$

$$l_{jk} \geq l_{ik} - d_j + p_j - M \cdot \left(1 - \sum_{k \in W} x_{ijk} \right) \quad \forall j \in C, i \neq j \quad (3.18)$$

$$l_{0k} \leq Q_k \quad \forall k \in W \quad (3.19)$$

$$l_{jk} \leq Q_k \quad \forall j \in C, k \in W \quad (3.20)$$

Παρακάτω διευκρινίζονται οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση του προβλήματος:

Πίνακας 3.1 Περιγραφή των μεταβλητών του μαθηματικού μοντέλου

Συμβολισμός	Περιγραφή ως προς το πρόβλημα
C	Το σύνολο των λιμένων του προβλήματος
W	Το σύνολο των πλοίων του προβλήματος
i, j, p	Λιμένες(κόμβοι) που ανήκουν στο C ($i, j=0$ για το κεντρικό λιμάνι)
k	Πλοίο που ανήκει στο W
d_i	Ζήτηση για τον κόμβο i
c_{ij}	Κόστος κατά τη διάσχιση της ακμής ij
Q_k	Χωρητικότητα για πλοίο k
t_{ijk}	Χρόνος διάσχισης της ακμής (ij) από πλοίο k
s_{ik}	Απαιτούμενος χρόνος εξυπηρέτησης κόμβου i από πλοίο k
T_k	Μέγιστος χρόνος διαδρομής για πλοίο k
a_j	Χρόνος άφιξης στο λιμάνι j
a_i	Χρόνος άφιξης στο λιμάνι i
l_{0k}	Φορτίο πλοίου k κατά την αναχώρηση από το κεντρικό λιμάνι
l_{jk}	Φορτίο πλοίου k κατά την αναχώρηση από το λιμάνι j
l_{ik}	Φορτίο πλοίου k κατά την αναχώρηση από το λιμάνι i
p_j	Φορτίο για παραλαβή στο λιμάνι j
M	Αυθαίρετα μεγάλος αριθμός

Η εξίσωση (3.1) παριστάνει την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος και αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους μεταφοράς του όλου στόλου. Ερμηνεύοντας τους περιορισμούς, αρχικά, να επισημανθεί ότι οι εξισώσεις (3.2) έως (3.11) αποτελούν την κλασική μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος δρομολόγησης με όριο μεταφορικής ικανότητας (CVRP). Συγκεκριμένα, οι περιορισμοί (3.2) και (3.3) διασφαλίζουν ότι η ζήτηση κάθε κόμβου του δικτύου εξυπηρετείται από ακριβώς ένα πλοίο. Η συνθήκη (3.4) υποδηλώνει την έξοδο κάθε πλοίου από κάθε κόμβο στον οποίο εισέρχεται, ενώ η (3.5) εκφράζει τη χωρητικότητα του κάθε πλοίου, η οποία φυσικά δε μπορεί να παραβιαστεί. Ο επόμενος περιορισμός θέτει το όριο του μέγιστου επιτρεπόμενου χρόνου ταξιδιού. Η συνθήκη (3.7) πραγματώνει το μεταβαλλόμενο περιορισμό (CCP), εκφράζοντας τη στοχαστικότητα του προβλήματος και διασφαλίζοντας ότι ο συνολικός χρόνος διαδρομής ενός πλοίου είναι μικρότερος από ένα άνω όριο τιμής (εν προκειμένω το μέγιστο χρόνο διαδρομής) για μία πιθανότητα α . Σημειώνεται ότι η τιμή α στην εν λόγω συνθήκη μπορεί να θεωρηθεί ως επίπεδο εμπιστοσύνης, το οποίο καθορίζεται εκ των προτέρων (Li et al, 2010). Βέβαια, ένας τέτοιος μεταβαλλόμενος περιορισμός είναι δυνατό να μετατραπεί σε

σταθερό περιορισμό, όπως θα αναλυθεί περαιτέρω. Ο σκοπός των περιορισμών (3.8) και (3.9) αφορά στη μη υπέρβαση του μέγιστου διαθέσιμου αριθμού πλοίων, ενώ λόγω των (3.10) και (3.11) αποφεύγεται ο σχηματισμός εσωτερικών υπο-διαδρομών σε κάθε δρομολόγιο. Οι συνθήκες (3.12) έως (3.15) σχετίζονται με τον καθορισμό των χρονικών ορίων (Wiley, 2000) και πιο συγκεκριμένα, οι περιορισμοί (3.12) και (3.13) καθορίζουν τους διαδοχικούς χρόνους άφιξης από λιμένα σε λιμένα βάσει του χρόνου διαδρομής και του χρόνου εξυπηρέτησης ενώ ο περιορισμός (3.15) οριοθετεί τους χρόνους άφιξης ώστε να μην υπερβαίνουν τους αργότερους δυνατούς. Επιπροσθέτως, οι περιορισμοί σχετικά με την ταυτόχρονη παραλαβή και διανομή εμπορευμάτων, όπως αυτοί προτάθηκαν από τον Dethloff (2001), περιγράφονται από τις εξισώσεις (3.16) έως (3.20). Ο πρώτος εξ'αυτών καθορίζει το αρχικό φορτίο του πλοίου, όταν αναχωρεί από τον κεντρικό λιμένα. Οι επόμενοι δύο περιορισμοί αντιστοιχούν στον υπολογισμό του έμφορτου εμπορεύματος του πλοίου κατά τον πρώτο και τους διαδοχικούς κόμβους της διαδρομής, ενώ οι δύο τελευταίοι αντικατοπτρίζουν τη μη υπέρβαση της χωρητικότητας του πλοίου και μπορούν να αντικαταστήσουν τον περιορισμό (3.5), όπως αυτός διατυπώθηκε στην κλασική μοντελοποίηση του CVRP.

Όπως σημειώθηκε παραπάνω, ο μεταβαλλόμενος περιορισμός (3.7) μπορεί να μετατραπεί σε σταθερό, προς χάριν απλοποίησης της επίλυσης. Επισημαίνεται ότι ο χρόνος ταξιδιού σε κάθε ακμή αποτελεί ανεξάρτητη και συνεχής μεταβλητή, η οποία θεωρητικά ακολουθεί μία άγνωστη κατανομή. Εφόσον προσδιοριστεί αυτή η άγνωστη κατανομή και καθοριστεί το επίπεδο εμπιστοσύνης, τότε ο συγκεκριμένος περιορισμός μπορεί να επέχει θέση ντετερμινιστικού. Βέβαια, η εύρεση της κατανομής προϋποθέτει μια αναλυτική και συνθετική διαδικασία, προκειμένου να εκτιμηθεί και να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση των καιρικών συνθηκών στον υπολογισμό του χρόνου διαδρομής.

Το σύνολο των παραπάνω περιορισμών συνιστά το ολοκληρωμένο μαθηματικό πρότυπο του προβλήματος STT-VRPSPDTD που εξετάζεται στην παρούσα εργασία. Οι επιμέρους ειδικές συνθήκες διαμορφώνουν το πλαίσιο επίλυσης του προβλήματος, ενώ παίζουν καθοριστικό ρόλο και στην επιλογή της κατάλληλης τεχνικής επίλυσης, η οποία αναπτύσσεται στο επόμενο Κεφάλαιο.

4. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕΘΕΥΡΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται και αναπτύσσεται ο γενετικός αλγόριθμος, που θα αποτελέσει το εργαλείο επίλυσης του μαθηματικού προτύπου της δρομολόγησης. Παράλληλα, παρουσιάζεται και το λογισμικό *EvoInver*, λογισμικό για την επίλυση του αλγορίθμου.

4.1 Γενικά στοιχεία επιλογής μεθόδου επίλυσης

Το στοχαστικό πρόβλημα δρομολόγησης στόλου αποτελεί επιμέρους πρόβλημα της γενικής κατηγορίας προβλημάτων δρομολόγησης, η οποία χαρακτηρίζεται ως NP-Πολυπλοκότητας κατηγορία.² Στην κατηγορία NP πολυπλοκότητας ανήκουν όλα τα προβλήματα απόφασης που επιλύονται από ένα μη ντετερμινιστικό αυτόματο σε πολυωνυμικό χρόνο. Δηλαδή, για την εύρεση της ακριβούς βέλτιστης λύσης του προτύπου απαιτείται υπολογιστικός χρόνος ο οποίος δεν μπορεί να εκτιμηθεί από ένα πολυώνυμο. Μάλιστα, όσο το μοντέλο μεγενθύνεται, ο υπολογιστικός χρόνος για την επίλυση του μοντέλου αυξάνει. Κατά συνέπεια, η επίλυση του προβλήματος καθίσταται δύσκολη διαδικασία. Η στοχαστική μοντελοποίηση του δε, αυξάνει την υπολογιστική δυσκολία καθώς και τη συνθετότητα της επίλυσης.

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές επίλυσης, οι οποίες ταξινομούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: **κλασικοί ευρετικοί αλγόριθμοι** και **μεθευρετικοί αλγόριθμοι**. Οι κλασικοί ευρετικοί αναπτύχθηκαν κυρίως μεταξύ 1960 και τέλη της δεκαετίας του 1990 (Mole&Jameson 1976, Wark&Holt 1994, Laporte et al. 2000), ενώ οι μεθευρετικοί, συνδυάζοντας την πρόοδο στην υπολογιστική ισχύ καθώς την εξέλιξη των αλγορίθμων, αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια. Οι

² Πιο συγκεκριμένα, το ευρύτερο πρόβλημα δρομολόγησης χαρακτηρίζεται ως NP-hard, δηλαδή τουλάχιστον τόσο «δύσκολο» όσο οποιοδήποτε πρόβλημα της κλάσης NP.

μεθευρετικοί αλγόριθμοι ταξινομούνται σε κατηγορίες με κριτήριο τη στρατηγική που χρησιμοποιούν. Οι Gendreau et al.(1996) και Cordeau et al.(2002) αναφέρονται σε ποικίλες μεθευρετικές μεθόδους: προσομοιωμένης ανόπτωσης, ντετερμινιστικής ανόπτωσης, αποικίες μυρμηγκιών (ant systems), tabu search, νευρωνικά δίκτυα και γενετικοί αλγόριθμοι. Η μέθοδος TabuSearch χρησιμοποιείται πιο συχνά στο πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή και πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει αλγορίθμους οι οποίοι βασίζονται σε αυτήν την μέθοδο (Gendreau, Laporte, Potvin&Semete 2002, Gendreau, Hertz&Laporte 1994). Τα τελευταία δέκα χρόνια μεγάλος αριθμός μεθευρετικών αλγορίθμων, οι οποίοι εμπνέονται από τους νόμους της φύσης, εφαρμόζονται στο πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή (Marinakis, Migdalas&Pardalos 2007, Prins 2004). Αξίζει να σημειωθεί πως σύμφωνα με τον Prins (2004), οι γενετικοί αλγόριθμοι στην επίλυση του κλασικού VRP, δεν έχουν την ίδια απόδοση με τη μέθοδο της έρευνας ταμπού (tabu search), παρόλα αυτά ο ίδιος πρότεινε ένα υβριδικό γενετικό αλγόριθμο ο οποίος δεν υστερεί καθόλου σε αποτελεσματικότητα από την tabu search.

Για την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου της παρούσας δρομολόγησης, υιοθετείται η μεθευρετική τεχνική του γενετικού αλγορίθμου. Η ευρεία εφαρμογή του στην επίλυση προβλημάτων δρομολόγησης με χρονοπαράθυρα (Bräysy et al., 2004), η μη ντετερμινιστική του φύση (Saita & Youssef, 1999) καθώς και η ανάγκη για υψηλής ποιότητας επίλυση σε εύλογο υπολογιστικό χρόνο (Jih και Hsu, 2004) συνεκτιμηθήκαν για την επιλογή του εν λόγω εργαλείου.

4.2 Επίλυση του μαθηματικού προτύπου-Γενετικοί αλγόριθμοι

4.2.1 Η έννοια του γενετικού αλγορίθμου

Οι γενετικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι προτάθηκαν από τον Holland (1975), αποτελούν μία από τις πιο διαδεδομένες μεταευρετικές τεχνικές, η οποία χρησιμοποιείται για την επίλυση δύσκολων και σύνθετων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Πρόκειται, στην ουσία, για αλγορίθμους επίλυσης προβλημάτων που είναι εμπνευσμένοι από τις αρχές της Βιολογικής Εξέλιξης, δηλαδή της διαδικασίας που οδηγεί στην αύξηση της ικανότητας ενός πληθυσμού να επιβιώνει σε ένα δεδομένο περιβάλλον. Με την αναπαραγωγή, η ικανότητα αυτή περνά στις επόμενες γενιές, από τα άτομα που την είχαν και επέζησαν, στη βάση της φυσικής

επιλογής. Κατ’αναλογία, στην περίπτωση της γενετικής βελτιστοποίησης, ένα σύνολο υποψήφια λύσεων αναπαράγεται και εξελίσσεται και οι καλύτερες λύσεις ανάμεσά τους επιλέγονται για να φέρουν την επόμενη γενιά, μέσα από μια σειρά από μετασχηματισμούς (Eiben and Smith, 2003; Reeves and Rowe, 2003). Αυτή η διαδικασία είναι επαναληπτική, με τις νέες γενιές λύσεων να παράγονται, εξελίσσονται και μετασχηματίζονται μέχρι την ικανοποίηση κάποιου κριτηρίου τερματισμού.

Βασικά χαρακτηριστικά των γενετικών αλγορίθμων:

- ❖ Πολλαπλή αναζήτηση σε πολλά σημεία ταυτόχρονα και όχι μόνο σε ένα
- ❖ Χρησιμοποιούν μόνο την αντικειμενική συνάρτηση και καμία επιπρόσθετη πληροφορία
- ❖ Χρησιμοποιούν πιθανοτικούς κανόνες αναζήτησης νέων λύσεων και όχι ντετερμινιστικούς.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται ο βασικός εξελικτικός κύκλος του γενετικού αλγορίθμου:

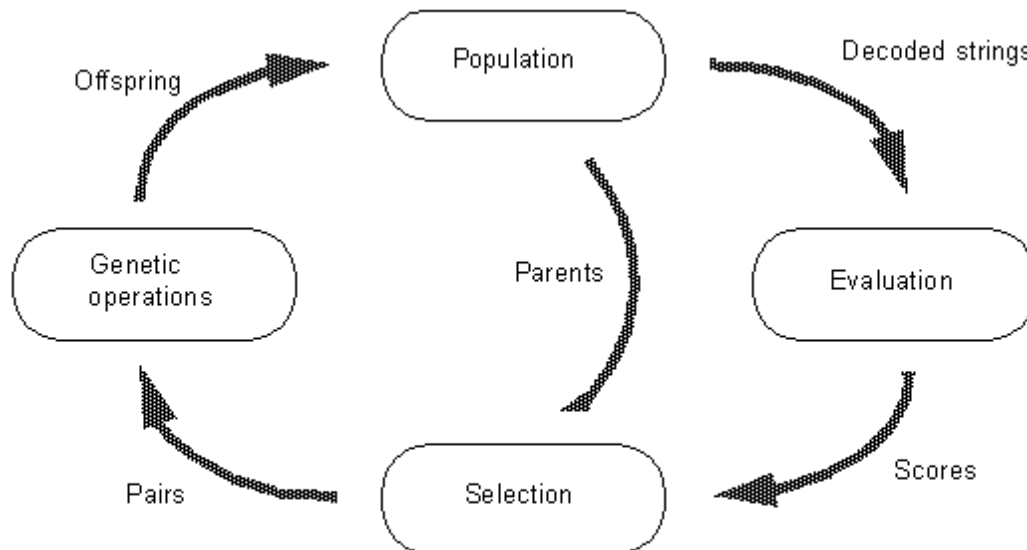


Figure 5.2: The “reproduction” cycle.

Σχήμα 4.1 Βασικός εξελικτικός κύκλος γενετικού αλγορίθμου (Πηγή: Μακρόπουλος & Ευστρατιάδης, 2011)

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, οι 4 φάσεις λειτουργίας του γενετικού αλγορίθμου είναι οι εξής:

1. Δημιουργία ενός πληθυσμού λύσεων.
2. Εξέλιξη κάθε λύσης.
3. Επιλογή των καλύτερων λύσεων.
4. Μετά από γενετικές διαδικασίες, προκύπτει η δημιουργία της νέας γενιάς πιθανών λύσεων.

Πιο συγκεκριμένα, οι γενετικοί αλγόριθμοι ξεκινούν με ένα σύνολο πιθανών λύσεων, που ονομάζεται πληθυσμός. Διατηρούν έναν πληθυσμό κωδικοποιημένων πιθανών λύσεων, που καλούνται άτομα ή χρωμοσώματα. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από διάφορα στοιχεία που ονομάζονται γονίδια. Κάθε γονίδιο είναι συνδεδεμένο με μία παράμετρο της λύσης. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η αντικειμενική συνάρτηση για κάθε άτομο (λύση) του δημιουργούμενου πληθυσμού, βάσει της επίδοσης (fitness measure). Ο πληθυσμός εξελίσσεται, βάσει της εφαρμογής γενετικών διαδικασιών, που επηρεάζονται από την επίδοση. Τέτοιες διαδικασίες είναι η επιλογή, η αναπαραγωγή και η μετάλλαξη. Με την ολοκλήρωση αυτού του σταδίου, δημιουργείται ένας νέος πληθυσμός που αντικαθιστά τον προηγούμενο, με κριτήριο την επίδοση. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να βρεθεί λύση. Μετά από κάποιον αριθμό γενιών και εφόσον καμιά βελτίωση δεν παρατηρείται πλέον, ο γενετικός αλγόριθμος τερματίζεται.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να γίνει ειδική μνεία για τους γενετικούς τελεστές που υπεισέρχονται κατά τη διαδικασία της εξέλιξης: επιλογή (selection), διασταύρωση (crossover) και μετάλλαξη (mutation). Κατά την επιλογή, εκλέγονται με κάποιο πιθανοτικό τρόπο, τα καταλληλότερα μέλη του πληθυσμού (γονείς), τα οποία χρησιμοποιούνται για τις άλλες δύο διαδικασίες. Ο τελεστής της διασταύρωσης συνδυάζει τα στοιχεία δύο χρωμοσωμάτων γονέων για να δημιουργήσει δύο νέους απογόνους ανταλλάσσοντας αντίστοιχα κομμάτια από τους γονείς, ενώ ο τελεστής της μετάλλαξης αλλάζει αυθαίρετα ένα ή περισσότερα γονίδια ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος.

4.2.2. Ανάπτυξη γενετικού αλγορίθμου για την επίλυση του προτύπου δρομολόγησης

Για την επίλυση του προβλήματος δομείται ένας γενετικός αλγόριθμος, ο οποίος απευθείας παράγει πιθανές διαδρομές (λύσεις), οι οποίες εξελίσσονται βάσει της επίδοσης, όπως αυτή εκφράζεται από το μέτρο καταλληλότητας ή μέτρο υγείας (fitness measure). Ως μέτρο

καταλληλότητας θεωρείται ο συνολικός χρόνος ταξιδιού για κάθε πιθανό σύνολο διαδρομών. Όπως είναι ευνόητο, στο πλαίσιο της ελαχιστοποίησης, διαδρομές με χαμηλό μέτρο υγείας είναι σαφώς πιο επιθυμητές. Όσο πιο χαμηλή καταλληλότητα έχει ένα χρωμόσωμα, τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα να συμπεριληφθεί στον πληθυσμό της επόμενης γενιάς. Ο αλγόριθμος τερματίζεται όταν μετά από έναν αριθμό επαναλήψεων, η τελική λύση που βρέθηκε, δε μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω.

Ο προτεινόμενος γενετικός αλγόριθμος ενσωματώνει τους δύο βασικούς περιορισμούς του προβλήματος: τον περιορισμό της μέγιστης χωρητικότητας του πλοίου και τον περιορισμό του χρονικού ορίου ταξιδιού. Κάθε λύση δηλαδή, που αξιολογείται στην αντίστοιχη φάση του αλγορίθμου, ελέγχεται και δεσμεύεται ως προς αυτές τις δύο παραδοχές, χωρίς όμως αυτή η δέσμευση να είναι ισοδύναμη και για τις δύο περιπτώσεις. Ο μηχανισμός διασφάλισης αυτών των περιορισμών θα αναλυθεί περαιτέρω. Η γενική επισκόπηση της διαδικασίας του γενετικού αλγορίθμου, που δομήθηκε στο πλαίσιο της εργασίας, παρουσιάζεται παρακάτω, με περιγραφή της αλληλουχίας των βημάτων που υλοποιούνται:

Βήμα 1^ο: Κωδικοποίηση των χρωμοσωμάτων

Υιοθετείται η ακέραια κωδικοποίηση για τα χρωμοσώματα, όπου ακέραιοι αριθμοί από το 1 μέχρι το n αντιπροσωπεύουν τους κόμβους (νησιά) του δικτύου. Κάθε λύση αποτελείται από n ακέραιους αριθμούς. Σύμφωνα με τον Prins (2004), η ακολουθία αυτή των αριθμών εκφράζει τη σειρά των λιμανιών που επισκέπτεται το πλοίο, στην περίπτωση που το ίδιο πλοίο έπρεπε να εξυπηρετήσει όλες τις διαδρομές του δικτύου, μία προς μία. Αν θεωρήσουμε, για παράδειγμα, ένα δίκτυο 9 νησιών, ένα πιθανό χρωμόσωμα θα μπορούσε να είναι το εξής: (3,5,2,8,1,6,4,7,9). Καθώς υπεισέρχεται το κομβικό λιμάνι (depot) με τον ακέραιο 0, μπορούμε να διακρίνουμε διάφορες πιθανές διαδρομές, χωρίς όμως αυτές να διαχωρίζονται ξεκάθαρα εντός της ακολουθίας του χρωμοσώματος. Επομένως, στην περίπτωση που διακρίνονται 3 διαδρομές στο παραπάνω παράδειγμα, αυτές θα μπορούσε να είναι οι 0-3-5-2-0, 0-8-1-6-0, 0-4-7-9-0. Ως εκ τούτου, ο κόμβος 0 δεν πρέπει να ενσωματώνεται στην ακολουθία κατά την εφαρμογή των τελεστών της επιλογής, της διασταύρωσης και της μετάλλαξης. Η μορφή αυτή του χρωμοσώματος επιτρέπει την εξαγωγή του βέλτιστου αριθμού διαδρομών και του συνεπαγόμενου αριθμού πλοίων.

Βήμα 2^ο: Δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού

Δημιουργείται ένας αρχικός πληθυσμός λύσεων, θέτοντας ως μέγιστο πληθυσμό 50 άτομα (λύσεις). Κάθε λύση, δομείται με τυχαίο τρόπο, βάσει της ακολουθίας των n νησιών του δικτύου.

Βήμα 3^ο: Καθορισμός του μέτρου υγείας (*fitness measure*)

Όπως έχει επισημανθεί, ως *fitness measure* θεωρείται ο συνολικός χρόνος ταξιδιού για κάθε πιθανό σύνολο διαδρομών. Ο συνολικός χρόνος διαδρομής συνίσταται στο χρόνο ταξιδιού και στο χρόνο εξυπηρέτησης επί του λιμένα. Η επίτευξη όσο το δυνατόν χαμηλότερης τιμής του συγκεκριμένου μέτρου αποτελεί αντικειμενικό σκοπό του γενετικού αλγορίθμου. Σύμφωνα με τους Karlaftis et al. (2009), ο συνολικός χρόνος διαδρομής υπολογίζεται ως εξής:

$$TT = \sum_{r \in R} \sum_{n \in V_r \subseteq V} t_{r,(n-1)n} + \sum_{m \in V} s_m \quad (4.1)$$

Όπου:

Πίνακας 4.1 Περιγραφή των μεταβλητών της συνάρτησης συνολικού χρόνου διαδρομής

Συμβολισμός	Περιγραφή-Ερμηνεία μεταβλητής
R	Το σύνολο των διαδρομών
V	Το σύνολο των λιμένων του δικτύου
r	Διαδρομή η οποία ανήκει στο R
V_r	Το σύνολο των κόμβων που ανήκουν στη διαδρομή r
N	Λιμάνι που ανήκει στο σύνολο V _r
m	Λιμάνι που ανήκει στο σύνολο V
t_{r,(n-1)n}	Χρόνος διαδρομής μεταξύ διαδοχικών λιμένων της διαδρομής r
s_m	Χρόνος εξυπηρέτησης για κόμβο m

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κάθε λύση ελέγχεται και δεσμεύεται ως προς τις δύο βασικές παραδοχές του προβλήματος και αυτό επιτυγχάνεται μέσω εξωτερικής διαδικασίας. Κατά την εφαρμογή αυτής τη διαδικασίας, καθορίζεται ως ισχυρός και απαράβατος ο περιορισμός της μέγιστης χωρητικότητας του πλοίου. Δηλαδή, κατά τη διάρκεια μίας διαδρομής, η έμφορτη δυνατότητα του πλοίου μπορεί να εξαντληθεί πλήρως αλλά σε καμία περίπτωση δε μπορεί να παραβιαστεί. Αντίθετα, τα χρονικά όρια διαδρομών

λαμβάνονται ως ασθενείς περιορισμοί, με την έννοια ότι υπάρχει δυνατότητα παραβίασής τους, χωρίς να αποκλείεται η αντίστοιχη λύση. Βέβαια, η ύπαρξη καθυστέρησης σε οποιαδήποτε διαδρομή αποτελεί προϋπόθεση για την ενεργοποίηση ρήτρας επιβολής ποινής επί της συγκεκριμένης διαδρομής, δεδομένου ότι ο επιπρόσθετος χρόνος ταξιδιού οδηγεί σε αύξηση του συνολικού χρόνου, που μεταφράζεται και σε αύξηση του συνολικού κόστους.

Η εν λόγω θεώρηση της φύσης των περιορισμών θεμελιώνεται στη σύγκριση του αναμενόμενου κόστους διόρθωσης για κάθε ενδεχόμενο. Η παραβίαση του περιορισμού χωρητικότητας ισοδυναμεί με δρομολόγηση περισσότερων πλοίων σε κάθε διαδρομή για την εξυπηρέτηση του ισοζυγίου ζήτησης-προσφοράς ανά κόμβο, ενώ η παραβίαση των χρονικών περιορισμών οδηγεί σε αυξημένες καθυστερήσεις. Είναι ευνόητο πως το κόστος επένδυσης, λειτουργίας και συντήρησης επιπρόσθετων πλοίων στο δίκτυο είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το κόστος που προκαλείται από τις εκτεταμένες καθυστερήσεις. Κατά συνέπεια, επιλέγεται η προαναφερόμενη προσέγγιση, που διασφαλίζει τη λειτουργία του ελάχιστου δυνατού αριθμού πλοίων, υπό την ενδεχόμενη επίδραση των αυξημένων καθυστερήσεων (Karlaftis et al. 2009).

Στην κατεύθυνση αυτή, η ποινή που επιβάλλεται για τις χρονικές καθυστερήσεις, λαμβάνεται ως ποσοστό του συνολικού χρόνου διαδρομής (όπως προτάθηκε από τον Thangiah (1995)). Η συνάρτηση καταλληλότητας (ή υγείας) μετατρέπεται ως εξής:

$$FF = \sum_{r \in R} \sum_{n \in V_r \subseteq V} t_{r,(n-1)n} + \sum_{m \in V} s_m + a \cdot \sum_{r \in R, m \in V} d_{rm} \quad (4.2)$$

Όπου:

Πίνακας 4.2 Περιγραφή των μεταβλητών της συνάρτησης καταλληλότητας

Συμβολισμός	Περιγραφή-Ερμηνεία μεταβλητής
a	Το ποσοστό του συνολικού χρόνου που υποδηλώνει την ποινή
d_{rm}	Καθυστέρηση άφιξης στο λιμένα m που περιέχεται στη διαδρομή r

Βήμα 4^ο: Εφαρμογή των γενετικών τελεστών

Για τον τελεστή της επιλογής, υιοθετείται μία προσέγγιση αναλογικής επιλογής (μηχανισμός ρουλέτας). Πιο συγκεκριμένα, τα μέλη του πληθυσμού κατατάσσονται βάσει του μέτρου καταλληλότητάς τους και η πιθανότητα επιλογής των ατόμων εξαρτάται από την κατάταξή τους. Δηλαδή, όσο πιο υψηλό είναι το μέτρο καταλληλότητάς του κάθε ατόμου, τόσο πιο μεγάλη η πιθανότητα να επιλεγθεί ως γονιός (parent). Φυσικά, αυτή η διαδικασία συνεχίζεται επαναληπτικά κατά τη διάρκεια του κύκλου του αλγορίθμου.

Σχετικά με τον τελεστή της διασταύρωσης, εφαρμόζεται η εξής διαδικασία, όπως αυτή διατυπώθηκε από τους Davis (1991), Eiben and Smith (2003):

- i) Δύο σημεία διασταύρωσης επιλέγονται τυχαία από τον πρώτο γονιό, ενώ το τμήμα μεταξύ των 2 σημείων παραμένει σταθερό και αντιγράφεται στον πρώτο απόγονο.
- ii) Με βάση το δεύτερο σημείο διασταύρωσης, τα εναπομείναντα γονίδια αντιγράφονται στον πρώτο απόγονο, βάσει της διάταξης που έχουν στον δεύτερο γονέα.

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για την εξαγωγή του δευτέρου απογόνου, με αντίστροφη των ρόλων των γονέων. Ένα παράδειγμα του τελεστή της διασταύρωσης, όπως εφαρμόζεται, ακολουθεί παρακάτω:

$$\begin{array}{ccc}
 (3,5,2,8,1,6,4,7,9) & \longrightarrow & (4,9,5,8,1,6,2,3,7) \\
 (4,9,1,5,2,6,8,3,7) & & (3,8,1,5,2,6,4,7,9)
 \end{array}$$

Σχετικά με τη διαδικασία της μετάλλαξης, επιλέγονται με τυχαίο τρόπο τα 2 γονίδια, των οποίων η τιμή αντιστρέφεται. Με αυτόν τον τρόπο παράγεται ένα νέο άτομο με πιθανότητα μετάλλαξης p_m . Η πιθανότητα αυτή να επιλεγεί ένα άτομο για τη διαδικασία της μετάλλαξης αποτελεί και το βαθμό μετάλλαξης (mutation rate), ο οποίος θα μας απασχολήσει κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου.

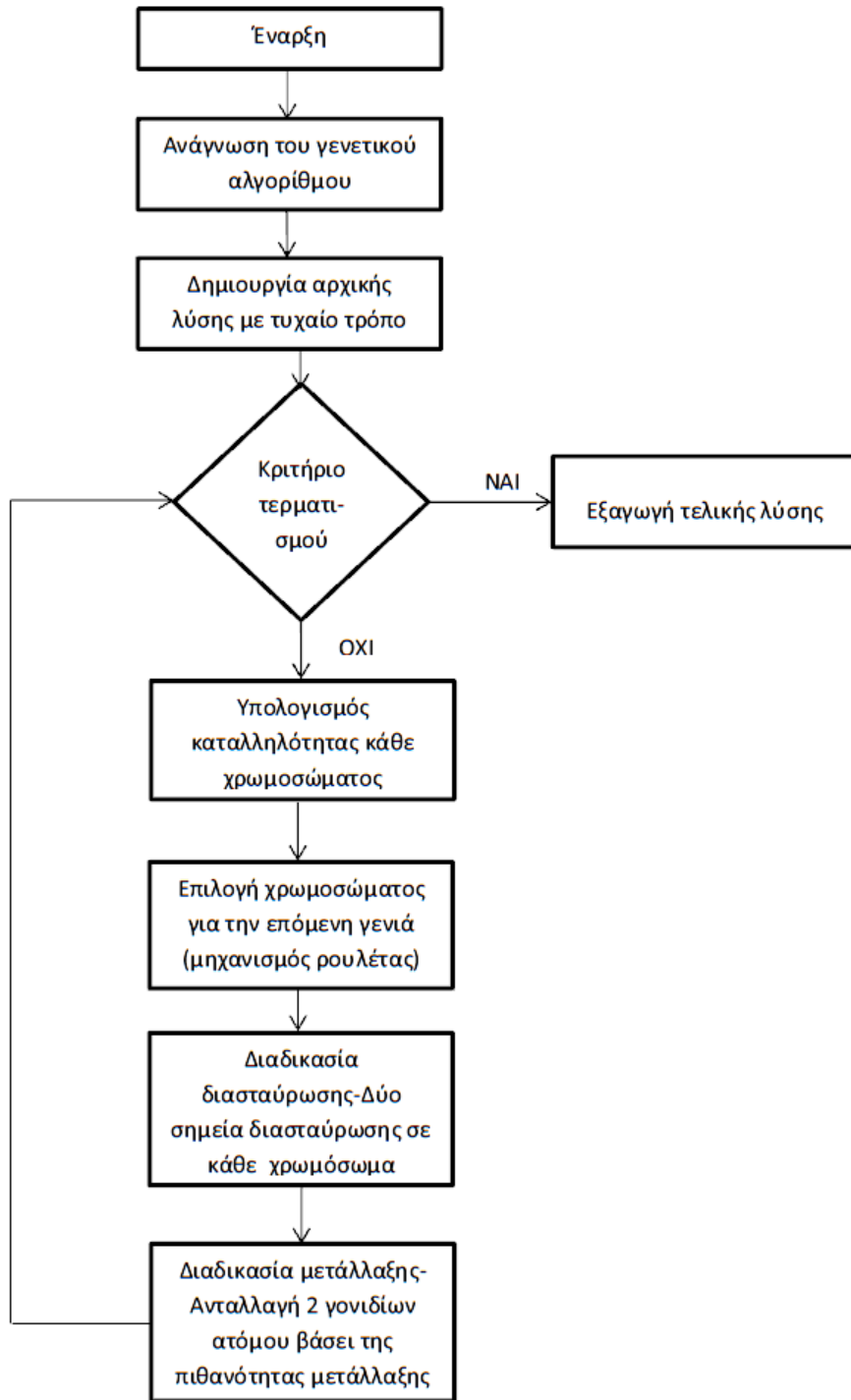
Βήμα 5^ο: Εξαγωγή των διαδρομών και τερματισμός του γενετικού αλγορίθμου

Για κάθε λύση (άτομο) που προκύπτει από τις παραπάνω διαδικασίες, είναι απαραίτητος ένας υπο-αλγόριθμος, ο οποίος θα διακρίνει στο χρωμόσωμα τις εφικτές διαδρομές,

σεβόμενος τον ισχυρό περιορισμό του μέγιστου μεταφερόμενου φορτίου. Στην ουσία, αυτός ο υπο-αλγόριθμος θα εξάγει τις δυνατές διαδρομές της κάθε λύσης καθώς και θα υπολογίζει το συνολικό κόστος ταξιδιού και φορτοεκφόρτωσης σε κάθε λιμένα. Πιο συγκεκριμένα, στο χρωμόσωμα το κάθε γονίδιο εκφράζει και ένα λιμένα του δικτύου. Το πρώτο γονίδιο στην ακολουθία του ατόμου εκφράζει τον πρώτο κόμβο της διαδρομής. Το επόμενο γονίδιο δηλώνει τον επόμενο σταθμό της διαδρομής. Σε κάθε κόμβο της διαδρομής, ελέγχεται ο περιορισμός της μέγιστης χωρητικότητας του πλοίου. Ο περιορισμός αυτός ελέγχεται για τη διαδρομή μεταξύ του κεντρικού λιμένα και του πρώτου νησιού, για τη διαδρομή μεταξύ αυτού και του επόμενου σταθμού καθώς και για τη διαδρομή μεταξύ επόμενου νησιού και κεντρικού λιμένα, στην περίπτωση που το πλοίο επιστρέφει στη βάση του. Ο έλεγχος του ισοζυγίου προσφοράς-ζήτησης εφαρμόζεται σε κάθε κόμβο διαδοχικά, δεδομένης της ταυτόχρονης παραλαβής και επίδοσης εμπορευμάτων. Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υπέρβαση της χωρητικότητας του πλοίου, κάτι που δεν επιτρέπεται ρητά από τη φύση του περιορισμού. Κάθε κόμβος που «εγκρίνεται» από τον παραπάνω τριπλό έλεγχο προστίθεται ως σταθμός φορτοεκφόρτωσης στο υπό διαμόρφωση δρομολόγιο. Σε αντίθετη περίπτωση, λαμβάνεται ως ο αρχικός σταθμός μίας νέας διαδρομής, αφού η χωρητικότητα του πλοίου δε μπορεί να το εξυπηρετήσει σε συνδυασμό και με τα προηγούμενα νησιά. Σε αυτό το σημείο, κρίνεται επιβεβλημένο να επισημανθεί ότι η προσφορά εμπορευμάτων κάθε νησιού στο δίκτυο έχει ως τελικό προορισμό το κεντρικό λιμάνι και όχι κάποιο άλλο νησί. Δεν επιτρέπονται, δηλαδή, οι εσωτερικές μετακινήσεις εμπορευμάτων. Κάτι τέτοιο ίσως δημιουργούσε ζητήματα χωρητικότητας του πλοίου σε μεμονωμένες ακμές της κάθε διαδρομής, όπως επίσης και θα παρέτεινε το χρόνο φορτοεκφόρτωσης λόγω πρόσθετων χειρισμών αναδιοργάνωσης του φορτίου. Η επαναληπτική αυτή διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου όλα τα νησιά του δικτύου ενσωματωθούν σε διαδρομές.

Μετά από έναν εύλογο αριθμό επαναλήψεων και εφόσον το μέτρο καταλληλότητας της μέχρι τότε βέλτιστης λύσης δε μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω, ο γενετικός αλγόριθμος τερματίζεται και η λύση με το χαμηλότερο μέτρο καταλληλότητας θεωρείται βέλτιστη.

Συνοπτικά, η διαδικασία του γενετικού αλγορίθμου για το πρόβλημα δρομολόγησης με ταυτόχρονη παραλαβή και παράδοση και χρονικούς περιορισμούς περιγράφεται από το παρακάτω διάγραμμα ροής:



Σχήμα 4.1 Διάγραμμα ροής γενετικού αλγορίθμου για το πρόβλημα STT-VRPSPDTD

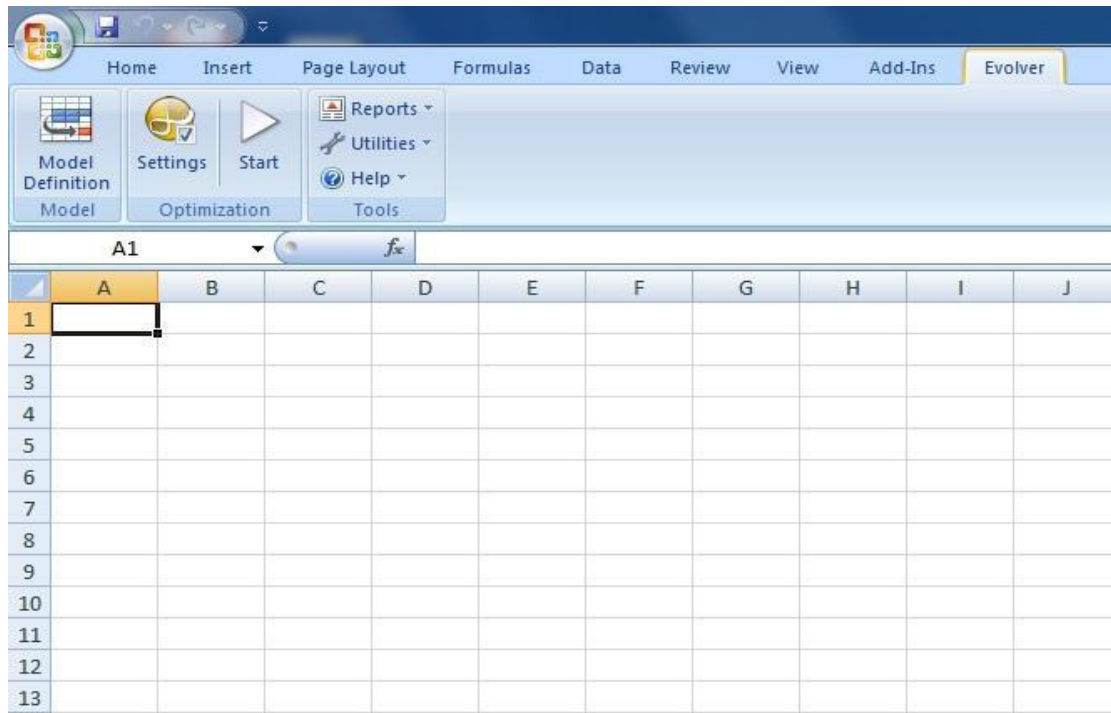
4.3 Επίλυση του γενετικού αλγορίθμου

Η επίλυση του γενετικού αλγορίθμου, που διαμορφώνεται για το υπό εξέταση πρόβλημα, υλοποιείται με τη βοήθεια συγκεκριμένου λογισμικού που διευκολύνει την εκτέλεση των απαραίτητων πράξεων και μειώνει δραστικά τον υπολογιστικό χρόνο. Πρόκειται για το λογισμικό Evolver 5.5. που αναπτύχθηκε από την εταιρεία Palisade Corp. Το λογισμικό αυτό είναι ένα πρόσθετο του Microsoft Excel και χρησιμοποιεί καινοτόμες τεχνολογίες γενετικών αλγορίθμων για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης σε εύρος εφαρμογών όπως σε χρηματοοικονομικές αναλύσεις, κατανομή πόρων, προϋπολογισμό μηχανολογικών μελετών κλπ. Σχεδόν οποιοδήποτε πρόβλημα μπορεί να εκφρασθεί στο Excel και εν συνεχεία να λυθεί από το Evolver βρίσκοντας την γενικότερη βέλτιστη λύση.

Πιο συγκεκριμένα, η μοντελοποίηση του εν λόγω προβλήματος δρομολόγησης γίνεται με το λογισμικό Excel® το οποίο παρέχει τους τύπους, τις συναρτήσεις κλπ ενώ η επίλυση του προτύπου γίνεται με το Evolver® το οποίο παρέχει το περιβάλλον εργασίας για τον προσδιορισμό του στόχου (δηλαδή της ποσότητας που πρέπει να βελτιστοποιηθεί) και τους μηχανισμούς για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός. Ως εκ τούτου, το πιο κρίσιμο κομμάτι αφορά στη διαμόρφωση του μοντέλου μέσω του Excel® ενώ η χρήση του evolver και ο προσδιορισμός της βέλτιστης λύσης συνιστά μια απλή διαδικασία.

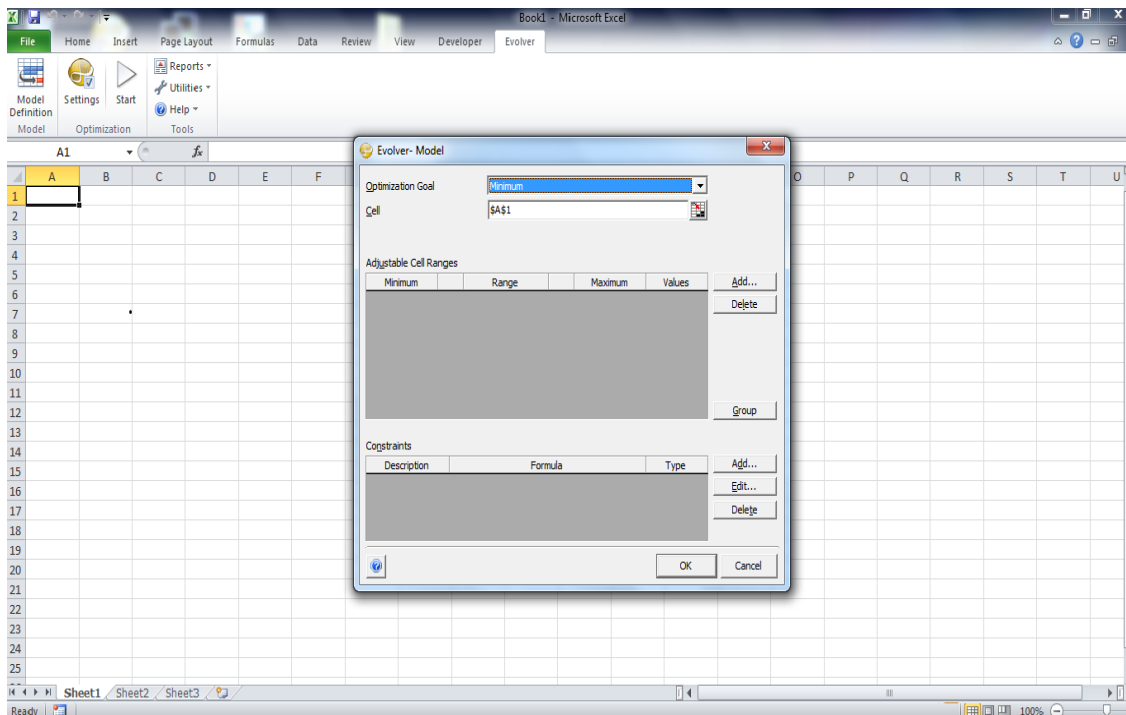
Το γενικότερο περιβάλλον διατηρεί τη δομή του Microsoft Excel, απλά εμφανίζεται ένα πρόσθετο, πατώντας πάνω στο οποίο εμφανίζεται το μενού επιλογών του Evolver. Στο μενού του λογισμικού περιλαμβάνονται:

- ❖ Η δυνατότητα καθορισμού του μοντέλου (model definition)
- ❖ Οι ρυθμίσεις των παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη κατά την επίλυση (settings)
- ❖ Το κουμπί εκκίνησης της διαδικασίας επίλυσης (Start)
- ❖ Άλλες επιλογές όπως η εμφάνιση των αναφορών για ήδη τετελεσμένες διαδικασίες επίλυσης ή κάποιες άλλες τεχνικές ρυθμίσεις του λογισμικού



Σχήμα 4.2 Μενού επιλογών του Evolver

Μέσω του **model definition** περιγράφεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης του Evolver. Πιο συγκεκριμένα, αφού επιλεγεί, εμφανίζεται ένα παράθυρο διαλόγου με την εξής μορφή:

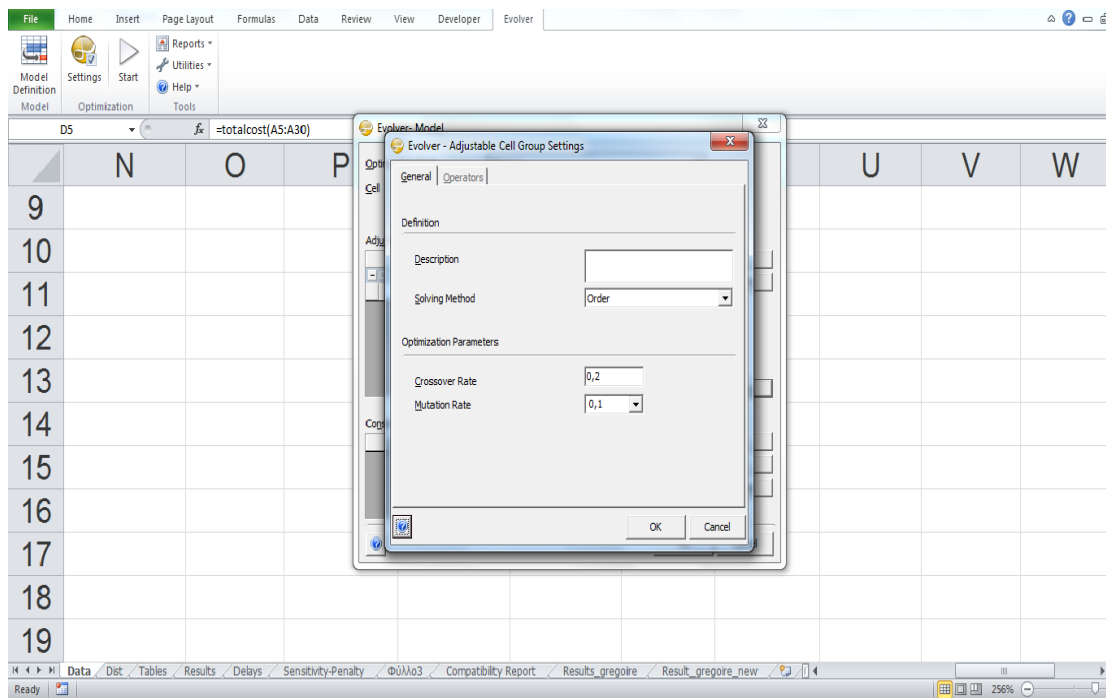


Σχήμα 4.3 Παράθυρο διαλόγου για τον καθορισμό του μοντέλου

Στο παράθυρο διαλόγου εμφανίζονται οι εξής επιλογές:

- i) **Optimization goal (Στόχος βελτιστοποίησης):** Καθορίζει τι είδους στόχο πρέπει το Evolver να αναζητήσει. Εν προκειμένω, επιλέγεται Minimum (Ελάχιστη), οπότε θα αναζητηθούν τιμές που ελαχιστοποιούν το κελί προορισμού (δηλαδή το μέτρο καταλληλότητας).
- ii) **Cell (κελί προορισμού):** Το κελί ή κελί προορισμού περιέχει την έξοδο του μοντέλου. Μια τιμή για αυτό το κελί προορισμού θα δημιουργηθεί για κάθε λύση που παράγει το Evolver (δηλαδή, κάθε συνδυασμός των πιθανών μεταβλητών κελιών). Για το γενετικό αλγόριθμο του προβλήματος, το κελί προορισμού συνδέεται με τα μεταβλητά κελιά μέσω μακροεντολών VBA (visual basic for applications) που έχουν δημιουργηθεί για αυτό το σκοπό. Καθώς το Evolver αναζητά για μια λύση, χρησιμοποιεί την τιμή του κελιού προορισμού ως εκτίμηση για να αξιολογήσει πόσο καλό είναι κάθε πιθανό σενάριο και να καθορίσει ποιες τιμές των μεταβλητών θα πρέπει να συνεχίσει να διασταυρώνει και ποιες να απορρίψει.
- iii) **Adjustable Cell Ranges (εύρος μεταβλητών κελιών):** Καθορίζονται οι ομάδες κελιών που σύμφωνα με το χρήστη, πρέπει το πρόγραμμα να ρυθμίζει κατά τη διαδικασία εύρεσης βέλτιστης λύσης. Ένα ή περισσότερα σύνολα κελιών μπορούν να εισαχθούν στο πεδίο της ρυθμιζόμενης ομάδας κελιών, τα οποία όμως χαρακτηρίζονται από κοινή μέθοδο, κοινό ποσοστό crossover και κοινό ρυθμό μετάλλαξης. Μέσω της επιλογής «Add» (Προσθήκη) που βρίσκεται δίπλα στη λίστα Adjustable Cell Ranges, μπορούν να εισαχθεί το κελί ή η ομάδα κελιών.
- iv) **Group:** Αποτελεί μια ιδιαίτερα σημαντική επιλογή, αφού ορίζονται κάποιες βασικές ρυθμίσεις για το σύνολο των κελιών του προηγούμενου χωρίου. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, που παρουσιάζει μια άποψη του αντίστοιχου παραθύρου, αρχικά πρέπει να επιλεγεί η μέθοδος επίλυσης (solving method), με την οποία μεταβάλλει τα αντίστοιχα κελιά που ορίστηκαν. Υπάρχουν οι εξής 6 μέθοδοι: Recipe solving method, Order Solving method, grouping solving method, budget solving method, project solving method, schedule solving method. Για το συγκεκριμένο αλγόριθμο που επιλύεται, επιλέγεται η μέθοδος order, της οποίας αντικείμενο αποτελεί η εναλλαγή των στοιχείων μιας λίστας ώστε να επιτευχθεί ο σκοπός που έχει τεθεί. Εν προκειμένω, τη λίστα συνιστούν τα κελιά που αντικατοπτρίζουν τους

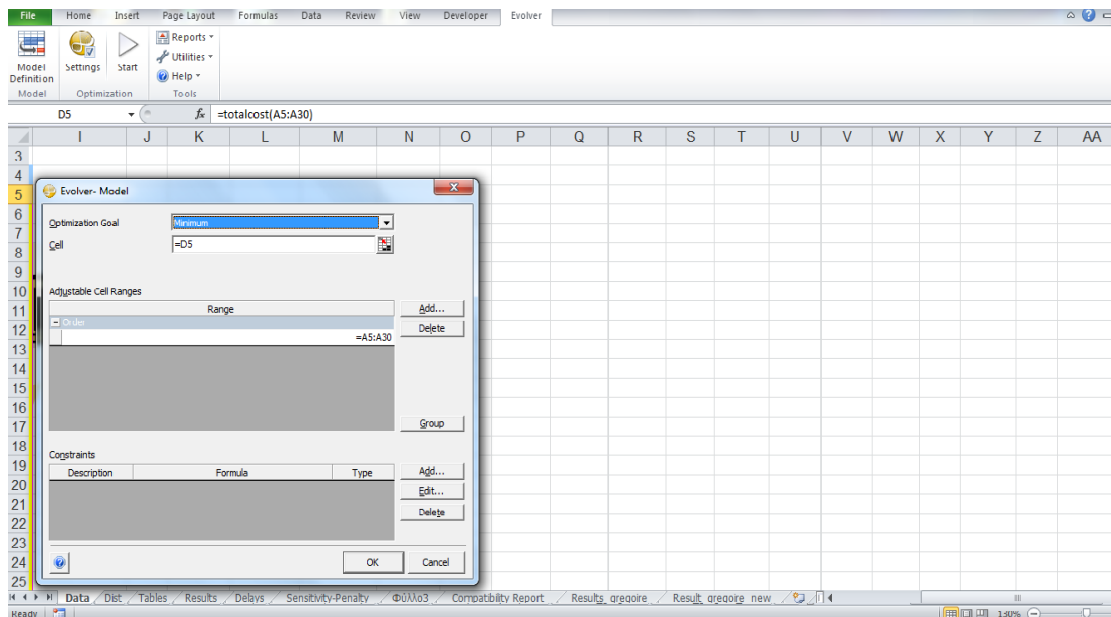
κόμβους του δικτύου μέσω ενός κωδικού αριθμού, ενώ ο σκοπός που έχει τεθεί είναι η ελαχιστοποίηση του fitness value.



Σχήμα 4.4 Παράθυρο διαλόγου της επιλογής group

Παρακάτω στο πλαίσιο διαλόγου εντοπίζονται ο **βαθμός διασταύρωσης** (crossover rate) και ο **βαθμός μετάλλαξης** (mutation rate). Το ποσοστό crossover μπορεί να ρυθμιστεί μεταξύ 0.01 και 1.0 και αντανακλά την πιθανότητα μελλοντικά σενάρια ή «οργανισμοί» να περιλαμβάνουν ένα μείγμα από πληροφορίες από την προηγούμενη γενιά των «ατόμων-λύσεων». Με άλλα λόγια, ένα ποσοστό της τάξης του 0.5 σημαίνει ότι ένας «απόγονος» θα περιέχει περίπου 50% των τιμών των «γονιδίων» του από τον ένα «γονέα» και τις υπόλοιπες τιμές από τον άλλο «γονέα». Ο ρυθμός μετάλλαξης μπορεί να ρυθμιστεί μεταξύ 0,0 και 1,0, και αντανακλά την πιθανότητα ότι μελλοντικά σενάρια θα περιέχουν μερικές τυχαίες τιμές. Ένα υψηλότερο ποσοστό μεταλλάξεων με απλά λόγια σημαίνει ότι περισσότερες μεταλλάξεις ή τυχαία «γονίδια» θα πρέπει να εισαχθούν στον πληθυσμό. Επειδή η μετάλλαξη συμβαίνει μετά από διασταύρωση, ο καθορισμός του βαθμού μετάλλαξης στο 1 (100% τυχαίες τιμές) θα αποτρέπει τη διασταύρωση από το να επιδρά στα νέα άτομα, και το Evolver θα δημιουργήσει εντελώς τυχαία σενάρια.

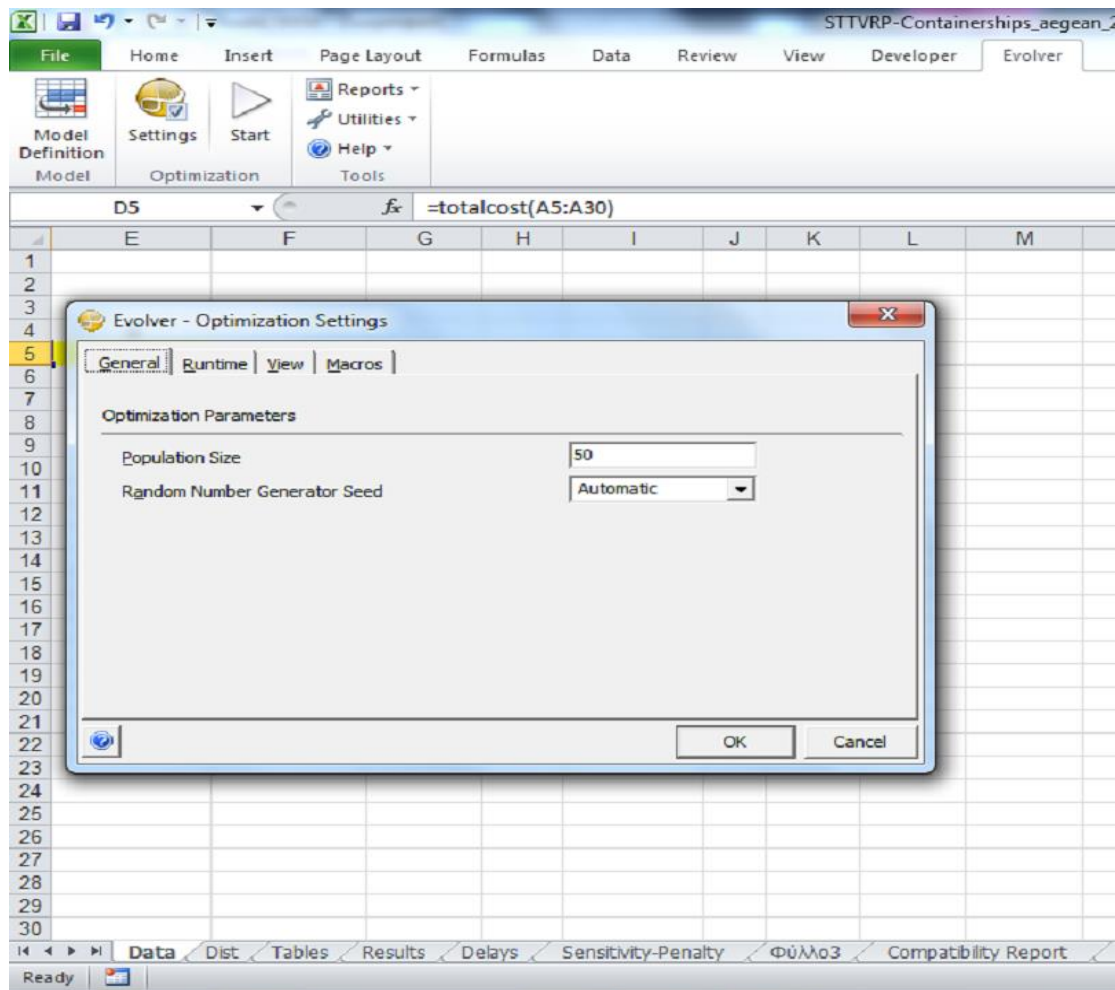
Μετά την επιλογή των παραμέτρων που αναφέρθηκαν, το παράθυρο διαλόγου του model definition λαμβάνει την εξής μορφή:



Σχήμα 4.5 Model definition μετά τον καθορισμό των παραμέτρων για την επίλυση του Γ.Α.

Στο πεδίο των περιορισμών (constraints) δε συμπεριλαμβάνονται οι συνθήκες του προβλήματος, δεδομένου ότι αυτές έχουν συμπεριληφθεί στις μακροεντολές που έχουν συνταχθεί.

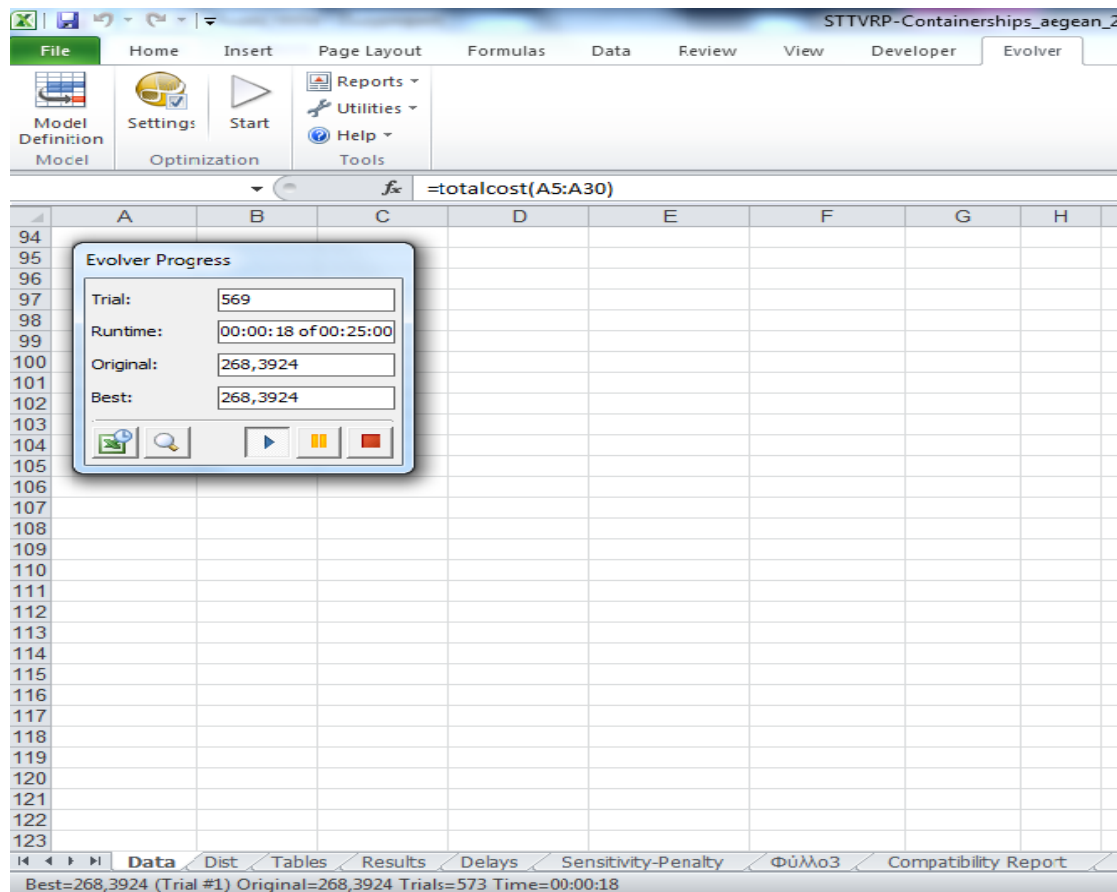
Επόμενη δυνατότητα στο κεντρικό μενού του λογισμικού αποτελούν οι **ρυθμίσεις (settings)**. Στην καρτέλα General μπορούμε να επιλέξουμε το μέγεθος του πληθυσμού από τον οποίο θέλουμε να ξεκινήσει η Βελτιστοποίηση. Η Random Number Generator Seed επιλογή επιτρέπει να ορίσουμε την αρχική τιμή για τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών που χρησιμοποιείται στο Evolver. Αυτή η αρχική τιμή επιλέγεται συνήθως αυτόματα από το λογισμικό, αλλά υπάρχει και η δυνατότητα χειροκίνητου καθορισμού.



Σχήμα 4.6 Επιλογή πληθυσμού και γεννήτριας τυχαίων αριθμών

Στην καρτέλα Runtime υπάρχει η δυνατότητα καθορισμού του χρόνου της βελτιστοποίησης είτε ορίζοντας μέγιστο αριθμό επαναλήψεων (trials) είτε μέγιστο χρόνο εκτέλεσης (time) είτε μέγιστη ποσοστιαία μεταβολή του κελιού-στόχου (progress) είτε ορίζοντας διακοπή της βελτιστοποίησης κατά συνθήκη (formula is true) καθώς και σε περίπτωση λάθους (stop on error). Στην καρτέλα View εμφανίζονται οι ρυθμίσεις ιδιοτήτων των εμφανιζόμενων επαναυπολογισμών και μπορούν είτε να ανανεώνονται τα κελιά με κάθε νέα βέλτιστη δοκιμή (every new best trial) είτε με κάθε δοκιμή (every trial). Τέλος, η καρτέλα Macros σχετίζεται με το πότε είναι επιθυμητό να εκτελεστούν οι μακροεντολές του προβλήματος.

Εφόσον ρυθμιστούν όλες οι παραπάνω αναγκαίες παράμετροι, μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία της βελτιστοποίησης με την επιλογή **Start (έναρξη)**. Με την έναρξη της εκτέλεσης, εμφανίζεται ένα παράθυρο που συνοψίζει την πρόοδο της βελτιστοποίησης, κατά την εξέλιξη της διαδικασίας:



Σχήμα 4.7 Εξέλιξη της διαδικασίας βελτιστοποίησης

Η ένδειξη trial αναφέρεται σε ποια δοκιμή κάθε στιγμή βρίσκεται η διαδικασία, η runtime το χρόνο που έχει περάσει από την εκκίνηση της βελτιστοποίησης, η original την αρχική τιμή του κελιού-στόχου και η best τη βέλτιστη τιμή που έχει επιτευχθεί μέχρι εκείνη τη στιγμή.

Όταν κάποια από τις συνθήκες τερματισμού ικανοποιηθεί και η εκτέλεση του αλγορίθμου ολοκληρωθεί, στο περιβάλλον εργασίας εμφανίζεται ως φύλλο εργασίας του Excel® αναφορά (optimization summary) με τις παραμέτρους που ορίστηκαν για τη βελτιστοποίηση, με τον αριθμό των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν καθώς και με τη βέλτιστη τιμή του κελιού-στόχου όπως προέκυψε από τη διαδικασία. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των επαναλήψεων (κατ' επέκταση και ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου), τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα για περαιτέρω βελτίωση της καλύτερης λύσης.

5. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΩΝ ΧΡΟΝΩΝ

ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναπτύχθηκε ο αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος. Βασική, όμως, είσοδος του γενετικού αλγορίθμου για την εύρεση της βέλτιστης δρομολόγησης αποτελούν οι χρόνοι διαδρομής μεταξύ των κόμβων του δικτύου, οι οποίοι εν γένει θεωρούνται στοχαστικοί. Το παρόν κεφάλαιο εστιάζει στη μεθοδολογία εκτίμησης των στοχαστικών χρόνων, περιγράφοντας το θεωρητικό υπόβαθρο αλλά και τη συνθετική διαδικασία που εφαρμόστηκε αφενός για τον προσδιορισμό των απαραίτητων στοιχείων ανεμολογικής φύσης αφετέρου για την τελική εξαγωγή των προσεγγιστικών κατανομών των χρόνων διαδρομής.

5.1 Γενικά- Εκτίμηση πιθανοτικής κατανομής ταχύτητας ανέμου

Για τις ανάγκες εκτίμησης της επίδρασης των καιρικών συνθηκών στην απόδοση του πλοίου και κατ' επέκταση στο χρόνο διαδρομής από το σημείο προέλευσης έως το σημείο προορισμού, απαιτείται ο προσδιορισμός ενός συνόλου ανεμολογικών παραμέτρων. Βασικές τέτοιες παράμετροι αποτελούν η μέση ταχύτητα καθώς και η διεύθυνση των ανέμων.

Ο άνεμος αποτελεί τη γενεσιουργό αιτία μιας σειράς δράσεων που επιδρούν στην πλεύση και στην απόδοση του πλοίου. Αυτές οι δράσεις συσχετίζονται αμιγώς με τις παραπάνω ανεμολογικές παραμέτρους. Η αντίσταση του ανέμου είναι συνάρτηση του τετραγώνου της ταχύτητας του ανέμου, οπότε η αύξηση της ταχύτητας του σηματοδοτεί μεγαλύτερη δυσκολία στην πλεύση του πλοίου (Ραμαντάνης, 2009). Επίσης, με την εμφάνιση του ανέμου δημιουργούνται θαλάσσια κύματα, τα οποία μεγαλώνουν σύμφωνα με την αύξηση της πίεσης του ανέμου και μετακινούνται κατά τη διεύθυνσή του, αλλά με ταχύτητα σαφώς μικρότερη της ταχύτητας μετάδοσής του.

Όπως είναι εύδηλο, προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι ανεμολογικές συνθήκες στην εύρεση της βέλτιστης διαδρομής ενός πλοίου είναι απαραίτητη η πιθανοτική

αποτύπωση της χρονικής μεταβολής των παραπάνω παραμέτρων και συνάμα η συνεπαγόμενη μεταβολή της ταχύτητας λειτουργίας του πλοίου. Σε αυτό το πλαίσιο, απαιτούνται μακροχρόνια ανεμολογικά στοιχεία ολόκληρης της περιοχής του δικτύου, τα οποία χρειάζεται να γίνουν αντικείμενο στατιστικής επεξεργασίας ώστε να εξαχθεί η συνδυαστική κατανομή της πιθανότητας εμφάνισης των διαφόρων τιμών της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου μέσα στο χρόνο.

Βάσει των παραπάνω, ο κατά τόπους υπολογισμός του αιολικού δυναμικού, σε μια ευρύτερη περιοχή με σημαντικές χωρικές μεταβολές του ανεμολογικού προφιλ, όπως είναι το Αιγαίο πέλαγος, συνιστά τη χρήση εκτεταμένων, μακροχρόνιων και αναλυτικών μετρήσεων. Ο όγκος, όμως, των δεδομένων και της επακόλουθης διαδικασίας στατιστικής επεξεργασίας σε συνδυασμό με την έλλειψη μετρήσεων για πολλές περιοχές οδηγεί στην υιοθέτηση ημιεμπειρικών μοντέλων, που περιγράφουν την ανεμολογική κατάσταση μιας περιοχής βάσει μικρού αριθμού παραμέτρων. Βασικές κατανομές πυκνότητας-πιθανότητας που χρησιμοποιούνται συνήθως για τον υπολογισμό του αιολικού δυναμικού είναι η κατανομή «Weibull» και η κατανομή «Rayleigh». Και οι δύο αυτές κατανομές είναι συνήθεις στις περιπτώσεις υπολογισμού της αιολικής ενέργειας μιας περιοχής, αφού συνιστούν μια πολύ καλή προσέγγιση της πραγματικής κατανομής της συχνότητας της ταχύτητας του ανέμου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι αναλυτικές κατανομές της πυκνότητας-πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου για κάθε νησί του δικτύου δρομολόγησης εξάγονται βάσει του πιθανοτικού προτύπου που εισήγαγε ο Weibull, μιας και έχει γενικότερη εμβέλεια παραμέτρων σε σχέση με την κατανομή Rayleigh. Πιο συγκεκριμένα, η Weibull προσδιορίζει την πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να βρίσκεται σε μια περιοχή της ταχύτητας «V» βάσει 2 παραμέτρων (k,C) και για ύψος μέχρι 100m πάνω από το έδαφος. Η αναλυτική έκφραση της κατανομής Weibull δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$f(V) = \frac{k}{C} \left[\frac{V}{C} \right]^{k-1} * \exp \left\{ - \left[\frac{V}{C} \right]^k \right\} \quad (5.1)$$

Η παράμετρος «C» της εξίσωσης συνδέεται με τη μέση ταχύτητα \bar{V} βάσει της σχέσης:

$$\bar{V} = C * \Gamma * \left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (5.2)$$

Όπου με «Γ» συμβολίζεται η αριθμητική συνάρτηση «Γάμα».

Αντίστοιχα, η δεύτερη παράμετρος της διανομής «Weibull» δηλαδή η παράμετρος «k» είναι αντιστρόφως ανάλογη της διασποράς «σ²» των ταχυτήτων του ανέμου ως προς τη μέση ταχύτητα, δηλαδή:

$$\sigma^2 = C^2 * \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \left(\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right)^2 \right] \quad (5.3)$$

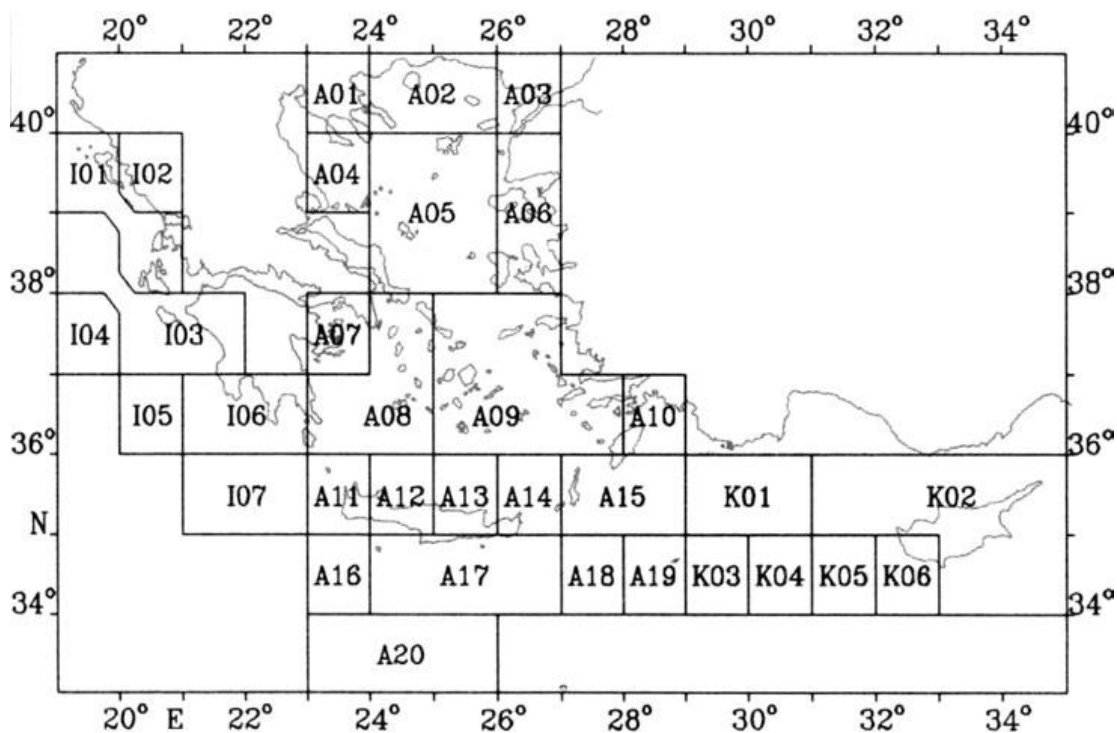
Μεγαλύτερες τιμές του k εκφράζουν μικρότερη διασπορά των ταχυτήτων του ανέμου και συνεπώς μεγαλύτερη συγκέντρωσή τους γύρω από τη μέση ταχύτητα. (Καλδέλλης, 2005)

5.2 Ανάλυση του ανεμολογικού προφίλ του Αιγαίου πελάγους

Επιχειρώντας μια συνοπτική περιγραφή της ανεμολογικής κατάστασης του Αιγαίου, επισημαίνεται ότι οι βόρειοι άνεμοι κυριαρχούν σε όλο το εύρος της περιοχής. Βέβαια, από τα τέλη Σεπτεμβρίου έως τα τέλη του Μαΐου και κυρίως κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, οι βόρειοι άνεμοι εναλλάσσονται με τους νοτιοδυτικούς. Τα μελτέμια, είναι οι δυνατοί, ξηροί, βόρειοι άνεμοι που πνέουν στο Αιγαίο πέλαγος από τα μέσα Μαΐου έως τα μέσα Σεπτεμβρίου. Οι βαρομετρικές συνθήκες, οι οποίες προκαλούν τους βόρειους αυτούς ανέμους, είναι η συνύπαρξη υψηλών βαρομετρικών πιέσεων στα κεντρικά Βαλκάνια και χαμηλών βαρομετρικών πάνω από την Τουρκία (Akdag et al., 2010). Κατά τη διάρκεια των θερμών καλοκαιρινών ημερών, τα μελτέμια φθάνουν στη μέγιστη έντασή τους κατά τις απογευματινές ώρες, ενώ συνήθως εξασθενούν τις βραδινές, αν και συχνά οι άνεμοι αυτοί παραμένουν ισχυροί για αρκετές ημέρες, δίχως σημαντική εξασθένηση. Στο Βόρειο Αιγαίο, τα μελτέμια εμφανίζονται από βορειοανατολικές προς βόρειες διευθύνσεις, ενώ κινούμενοι νοτιότερα, στο Κεντρικό Αιγαίο, πνέουν κυρίως προς βόρειες διευθύνσεις. Στο νότιο Αιγαίο,

στο Κρητικό και στο Καρπάθιο πέλαγος οι άνεμοι αυτοί εμφανίζονται ως βορειοδυτικοί. Όσον αφορά τις παλίρροιες της λεκάνης του Αιγαίου, φαίνεται να ακολουθούν τις κινήσεις αυτών της Ανατολικής Μεσογείου γενικά, ενώ τα ρεύματα του Αιγαίου δεν παρουσιάζουν ομαλότητα είτε από τη σκοπιά της ταχύτητας τους είτε από τη σκοπιά της διεύθυνσής τους, αφού επηρεάζονται σημαντικά από τους πνέοντες ανέμους. (Bagiorgas et al., 2012).

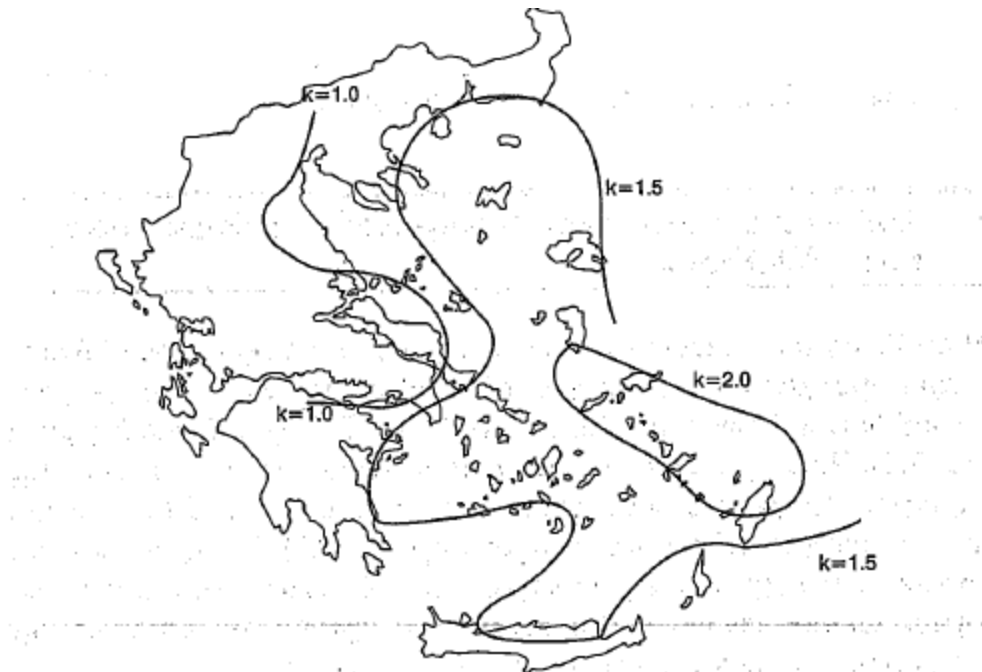
Η μακροχρόνια ανάλυση των μετεωρολογικών στοιχείων της χώρας οδήγησε τους ερευνητές στη διάκριση ευρύτερων περιοχών, με σημαντική ομοιότητα ως προς τις κύριες ανεμολογικές και κυματικές παραμέτρους (ταχύτητα/διεύθυνση ανέμου, μήκος κύματος κλπ). Οι περιοχές αυτές έχουν προκύψει μετά από στατιστικό έλεγχο ομοιογένειας του κυματικού κλίματος γειτονικών στοιχειωδών περιοχών, ονομάζονται ομοιογενείς περιοχές, είναι 33 και φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



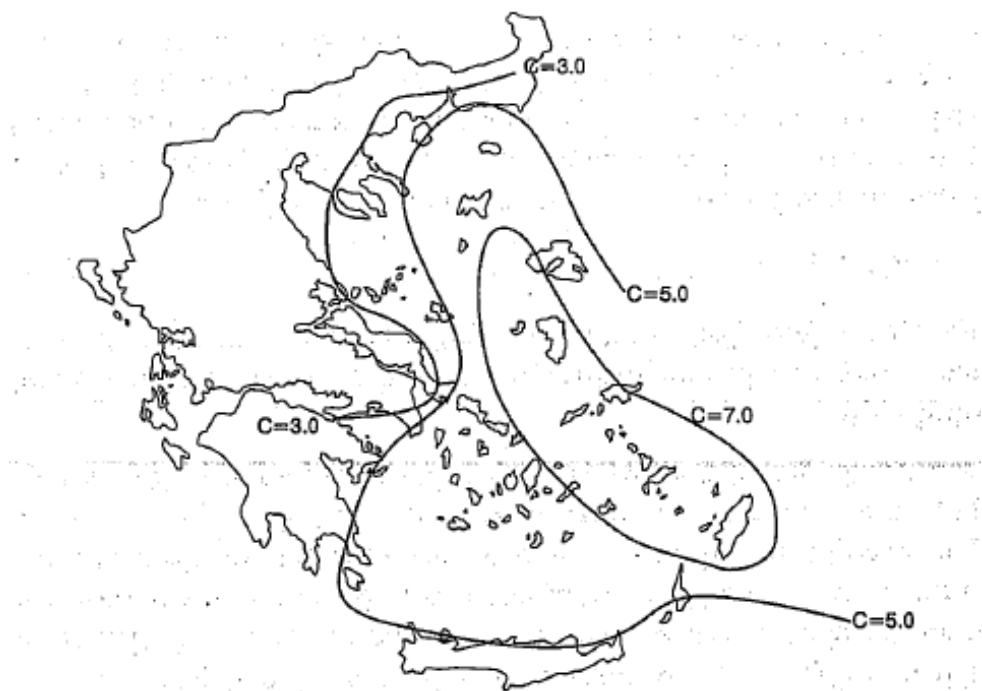
Σχήμα 5.1 Κυματικά και ανεμολογικά ομοιογενείς ζώνες στη Βορειοανατολική Μεσόγειο (Πηγή: Άτλας Ανέμου και Κύματος Βορειοανατολικής Μεσογείου Θαλάσσης)

Παράλληλα, έχουν δημιουργηθεί από τους ερευνητές και γεωγραφικοί χάρτες, οι οποίοι περιγράφουν τη χωρική κατανομή των παραμέτρων «Weibull» (C,k). Έτσι, για τη γεωγραφική περιοχή του Αιγαίου οι τιμές της παραμέτρου «C» βρίσκονται μεταξύ του πέντε και του επτά ($5.0 \leq C \leq 7.0$), ενώ οι τιμές της παραμέτρου «k» βρίσκονται στην περιοχή 1.3 έως 2. Βέβαια, για αρκετές μεμονωμένες περιοχές οι τιμές της παραμέτρου «C» πλησιάζουν

τα 10 m/sec ενώ η παράμετρος «k» υπερβαίνει την τιμή 2. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται οι γεωγραφικές κατανομές των 2 παραμέτρων στο Αιγαίο πέλαγος:



Σχήμα 5.2: Γεωγραφική κατανομή παραμέτρου "k" στο Αιγαίο πέλαγος. Πηγή: Καλδέλλης (2005)



Σχήμα 5.3: Γεωγραφική κατανομή παραμέτρου "C" στο Αιγαίο πέλαγος. Πηγή: Καλδέλλης (2005)

Παράλληλα, πολλές ερευνητικές εργασίες έχουν εκπονηθεί για τον υπολογισμό των παραμέτρων της κατανομής Weibull σε τοπικό επίπεδο. Βέβαια, για την ίδια περιοχή, οι υπολογισθείσες παράμετροι της κατανομής μπορεί να παρουσιάζουν αποκλίσεις, δεδομένης της διαφοροποίησης των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό τους. Οι πιο σημαντικές εξ' αυτών είναι η γραφική μέθοδος, η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων, η μέθοδος μέγιστης πιθανοφάνειας, η τροποποιημένη μέθοδος μέγιστης πιθανότητας και η μέθοδος τυπικής απόκλισης. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ορισμένες τιμές των παραμέτρων σε διάφορες περιοχές του Αιγαίου, όπως έχουν προσδιοριστεί από αντίστοιχες ερευνητικές εργασίες:

Πίνακας 5.1 Τυπικές τιμές παραμέτρων Weibull για διάφορες περιοχές του Αιγαίου

Περιοχή	Παράμετρος k	Παράμετρος C	Πηγή
Ρόδος	2,14	7,24	
Σκύρος	1,51	5,62	Καλδέλλης (2005)
Μήλος	1,41	5,84	
Μυτιλήνη	1,56	4,99	
Μίκρα Θεσσαλονίκης	1,26	3,20	Vogiatzis et al. (2004)
Ικαρία- Μύκονος	1,90	8,00	Zafirakis et al.
Σάμος	2,56	7,87	Τζώρτζης (2011)
Λέσβος	1,62	7,45	Bagiorgas et al. (2012)
Σαντορίνη	1,82	7,21	

5.3 Χάρτης ανεμολογικών παραμέτρων στο Αιγαίο πέλαγος

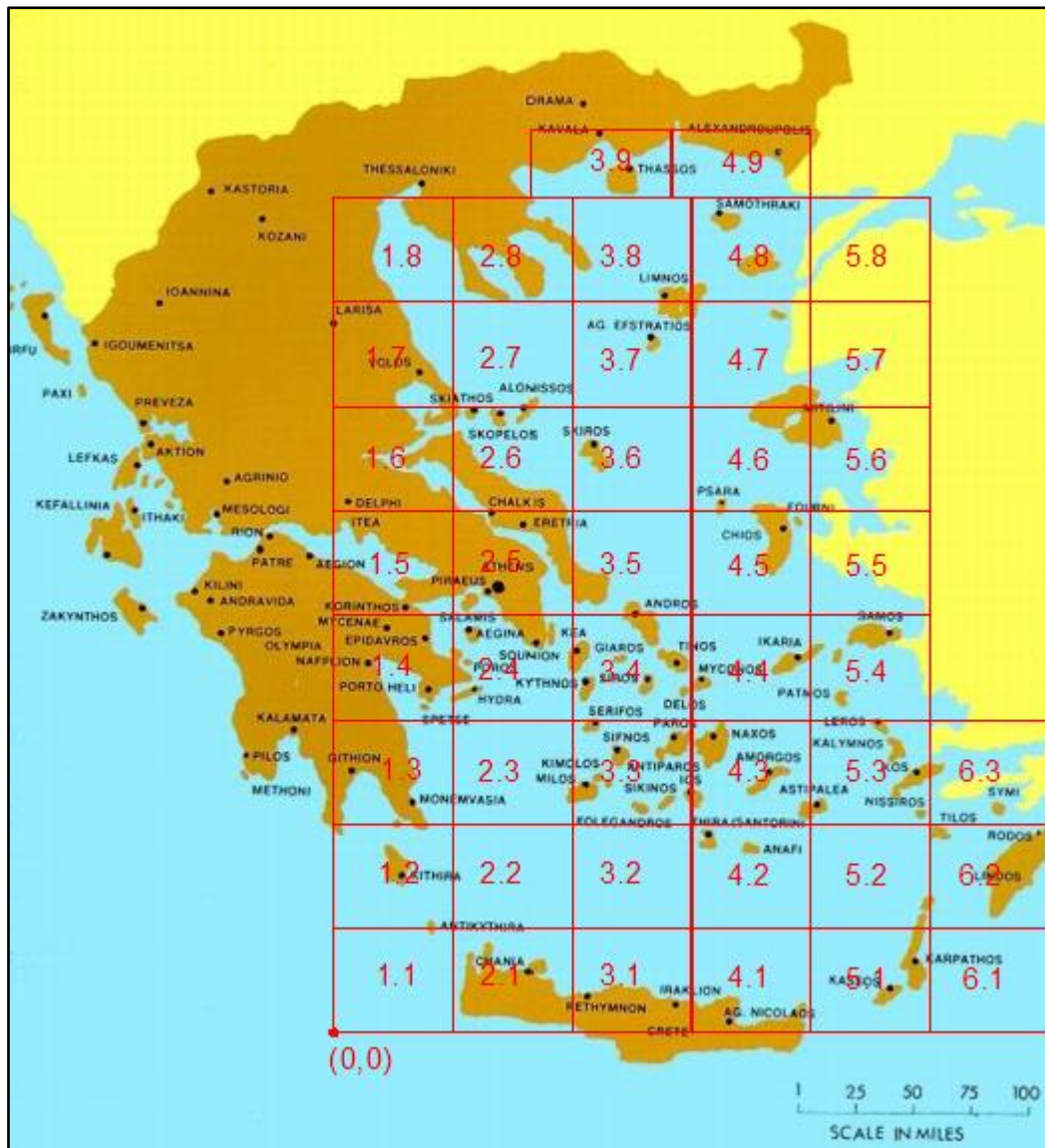
Υπενθυμίζεται, ότι στο συγκεκριμένο στάδιο της διπλωματικής εργασίας, επιχειρείται να «ποσοτικοποιηθεί» η επίδραση των ανέμων στη συνολική επίδοση του πλοίου και για αυτό το λόγο, είναι αναγκαία η εξαγωγή των κατανομών πυκνότητας-πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου για κάθε περιοχή του Αιγαίου, που σχετίζεται με κόμβο προέλευσης-προορισμού του υπό εξέταση δικτύου. Η μόρφωση αυτή των κατανομών θα πραγματοποιηθεί στη βάση δύο σημαντικών παραδοχών:

1. Η χρήση της κατανομής Weibull είναι κατάλληλη για τη στατιστική περιγραφή της ανεμολογικής κατάστασης του Αιγαίου.
2. Η κατανομή πυκνότητας-πιθανότητας αφορά κάθε επιμέρους τμήμα του Αιγαίου, που παρουσιάζει ανεμολογική ομοιογένεια και κατά συνέπεια οι παράμετροι της Weibull μπορούν να θεωρηθούν σταθεροί.

Εξ' αιτίας της παραδοχής (2), κρίνεται πρόδηλη η ανάγκη για διαχωρισμό του Αιγαίου σε ζώνες ανεμολογικής ομοιογένειας. Ο καθορισμός τους καθώς και ο προσδιορισμός των στατιστικών παραμέτρων των ζωνών αυτών αποτελεί αφενός απαραίτητη προϋπόθεση για μια προσεγγιστική απεικόνιση του γεωγραφικά διαφοροποιημένου ανεμολογικού προφίλ, αφετέρου μία σύνθετη διαδικασία, που μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές αποκλίσεις ως προς την ακρίβεια καθώς και τη γεωγραφική εμβέλεια των εξαγόμενων κατανομών ανέμου. Στο πλαίσιο αυτό, θέτοντας ως απαρέγκλιτο υπόβαθρο τον προσεγγιστικό χαρακτήρα των κατανομών, επιδιώκεται η χάραξη ενός κανάβου επί του Αιγαίου πελάγους, όπου οριοθετούνται γεωγραφικά οι ζώνες ανεμολογικής ομοιογένειας βάσει της τιμής των παραμέτρων της κατανομής Weibull. Η διαμόρφωση αυτού του κανάβου στηρίζεται:

- i) Στις ισοπαραμετρικές καμπύλες της χωρικής κατανομής της κατανομής Weibull που περιγράφηκαν παραπάνω.
- ii) Στις κυματολογικά ομοιογενείς περιοχές όπως αυτές παρουσιάζονται στον Άτλαντα Ανέμου και Κύματος Βορειοανατολικής Μεσογείου Θαλάσσης.
- iii) Σε επιμέρους ερευνητικές εργασίες για τον υπολογισμό των παραμέτρων Weibull σε διάφορες θέσεις του Αιγαίου πελάγους.

Βάσει των παραπάνω, το Αιγαίο πέλαγος διακρίνεται νοητά σε 45 ισομεγέθη τετραγωνικά τμήματα κανάβου, με πλευρά περίπου 52 ναυτικών μιλίων το καθένα (με εξαίρεση δύο ακραία τμήματα στο Θρακικό πέλαγος που έχουν διαστάσεις 60*30 ναυτικά μίλια). Η ονομασία του κάθε τμήματος απαρτίζεται από 2 ψηφία, όπου το πρώτο απεικονίζει τη σχετική θέση του στον οριζόντιο άξονα, ενώ το δεύτερο αντίστοιχα στον κατακόρυφο άξονα. Παρακάτω, παρουσιάζεται ο χάρτης της Ελλάδας με σχεδιασμένο τον κানাβο επί του Αιγαίου πελάγους:



Σχήμα 5.4 Χάρτης ανεμολογικών παραμέτρων του Αιγαίου πελάγους

Όπως έχει επισημανθεί, για κάθε τμήμα του κανάβου αντιστοιχούν συγκεκριμένες τιμές των 2 παραμέτρων της κατανομής Weibull, ο προσδιορισμός των οποίων θεμελιώνεται αφενός σε ήδη υπάρχοντα αναλυτικά ημι-εμπειρικά μοντέλα, αφετέρου είναι συνάρτηση της γεωγραφικής θέσης του κάθε τμήματος. Οι τιμές αυτές αντικατοπτρίζουν προσεγγιστικά το ανεμολογικό προφίλ του κάθε τμήματος, αφού παρέχουν αναλυτικές πληροφορίες για την κατανομή της πιθανότητας εμφάνισης των διαφόρων τιμών ταχύτητας μέσα στο χρόνο. Για το σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οι τιμές αυτές θεωρούνται σταθερές καθ' όλη την επιφάνεια του τμήματος. Στον κάτωθι πίνακα προσδιορίζονται γεωγραφικά οι ομοιογενείς ανεμολογικές ζώνες που προκύπτουν εκ του κανάβου καθώς και παρουσιάζονται οι εκτιμώμενες τιμές των παραμέτρων για καθεμία εξ' αυτών:

Πίνακας 5.2 Παράμετροι ανεμολογικών ζωνών του Αιγαίου πελάγους

Ονομασία Ζώνης	Γεωγραφικός προσδιορισμός	Παράμετρος C	Παράμετρος k
1.1	Νοτιοδυτικό Αιγαίο	4,7	1,4
2.1	Χανιά-Δυτική Κρήτη	4,8	1,52
3.1	Ηράκλειο-Ρέθυμνο	4,9	1,65
4.1	Άγιος Νικόλαος-Ανατολική Κρήτη	4,9	1,5
5.1	Κάσος-Κάρπαθος	5,5	1,5
6.1	Θαλάσσια περιοχή ανατολικά της Καρπάθου-Καρπάθιο πέλαγος	5	1,4
1.2	Κύθηρα-Αντικύθηρα-Κρητικό πέλαγος	5,3	1,3
2.2	Θαλάσσια περιοχή ανατολικά των Κυθήρων	5,5	1,4
3.2	Θαλάσσια περιοχή μεταξύ Κρήτης και Νοτιοδυτικών Κυκλάδων	6	1,4
4.2	Νότιες Κυκλάδες (Θήρα-Ανάφη)	6,5	1,6
5.2	Καρπάθιο πέλαγος	7	1,8
6.2	Ρόδος-Τήλος	7,25	2,15
1.3	Μυρτώο πέλαγος (παράλια Πελοποννήσου)	5	1,5

2.3	Μυρτώο πέλαγος (μέχρι τις Δυτικές Κυκλάδες)	5,5	1,6
3.3	Δυτικές Κυκλάδες (Σέριφος-Σίφνος-Μήλος-Σίκινοσ-Φολέγανδροσ-Πάροσ)	5,9	1,5
4.3	Νοτιοανατολικές Κυκλάδες (Νάξοσ-Αμοργόσ-Ίοσ) και Αστυπάλαια	6,9	1,7
5.3	Δωδεκάνησα (Λέροσ-Κάλυμνοσ-Κωσ-Νίσυροσ)	7,5	2,2
6.3	Θαλάσσια περιοχή Σύμησ	7	2
1.4	Κόλποσ Αργολίδασ	4,5	1,5
2.4	Αργοσαρωνικόσ μέχρι το Κάβο ντόρο	5,5	1,6
3.4	Βόρειεσ Κυκλάδεσ(Κέα-Κύθηνοσ-Σύροσ-Τήνοσ-Άνδροσ)	6,5	1,7
4.4	Μύκοноσ-Ικαρία-Ικάριο πέλαγοσ	8	1,9
5.4	Από Πάτμο έωσ Σάμο	7,5	2,2
1.5	Κορινθιακόσ κόλποσ-παράλια Σαρωνικόσ κόλπου	3	1
2.5	Αττική-Σαρωνικόσ κόλποσ	3	1
3.5	Βόρεια τησ Άνδροσ-Ανατολικά τησ Εύβοιασ	6	1,6
4.5	Χίοσ-Φούρνοι	7,5	1,9
5.5	Θαλάσσια περιοχή βόρεια τησ Σάμου	7	1,9
1.6	Βόρειοσ Ευβοϊκόσ Κόλποσ	3	1,1
2.6	Σποράδεσ(Σκιάθοσ-Σκόπελοσ-Αλόνησοσ)	4	1,1
3.6	Σκύροσ	5,5	1,5
4.6	Λέσβοσ-Ψαρά	7,2	1,7
5.6	Μυτιλήνη-Νοτιοανατολική Λέσβοσ	6	1,5
1.7	Ανοιχτά των Θεσσαλικών ακτών	3	1,2
2.7	Θαλάσσια περιοχή μεταξύ Σποράδων και Χαλκιδικήσ-Βόρειο Αιγαίο	4	1,3

3.7	Λήμνος-Άγιος Ευστράτιος	6,3	1,7
4.7	Από Βόρεια Λέσβο έως Τένεδο	6,2	1,6
5.7	Στενό Μυτιλήνης-Τουρκικά παράλια	5,5	1,5
1.8	Παράλια Πιερίας-Ανατολική Χαλκιδική	3	1,2
2.8	Θαλάσσια περιοχή στα παράλια της Χαλκιδικής	4	1,5
3.8	Βόρεια-Βορειοδυτικά της Λήμνου	6	1,6
4.8	Σαμοθράκη-Ίμβρος	5,5	1,6
5.8	Στενά του Ελλησπόντου	5	1,4
3.9	Θρακικό πέλαγος-Θάσος	4,5	1,5
4.9	Θρακικό πέλαγος-Θαλάσσια περιοχή Αλεξανδρούπολης	5	1,5

5.4 Επίδραση του ανέμου στην ταχύτητα του πλοίου

Όπως έχει υπογραμμιστεί, στο πρόβλημα δρομολόγησης που πραγματεύεται η παρούσα εργασία οι χρόνοι διαδρομής μεταξύ των κόμβων του δικτύου θεωρούνται μη σταθεροί, αλλά άμεσα συσχετισμένοι με τις καιρικές συνθήκες, μιας και η επίδραση τους μεταβάλλει την ταχύτητα κανονικής λειτουργίας του πλοίου και επακολούθως το χρόνο διαδρομής. Δεδομένου ότι οι άνεμοι αποτελούν τον επικρατέστερο παράγοντα πρόκλησης κυματισμών στη επιφάνεια της θάλασσας, τίθεται ως αντικείμενο αναζήτησης η ποσοτική και ποιοτική εκτίμηση του συσχετισμού μεταξύ ανέμου και πλοίου. Ο συσχετισμός αυτός συνιστά μια ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία, αφού η συνθετότητα και η μεταβλητότητα των πραγματικών συνθηκών πλεύσης εισάγουν μια σειρά από διαφορετικές θεωρίες για την περιγραφή αφενός της κυματικής κατάστασης αφετέρου της δυναμικής συμπεριφοράς του πλοίου. Για αυτό το λόγο, επιχειρείται μια συνοπτική αναφορά όλων εκείνων των διεργασιών που υπεισέρχονται κατά την αλληλεπίδραση ανέμου-πλοίου ώστε να κατανοηθεί ο μηχανισμός απομείωσης της ταχύτητας του πλοίου στις εκάστοτε συνθήκες ανέμου.

5.4.1 Άνεμοι και πρόκληση κυματισμών

Οι κυματισμοί της θάλασσας, που είναι υπεύθυνοι για τη διέγερση της δυναμικής συμπεριφοράς των πλοίων, δημιουργούνται από τον άνεμο. Ο άνεμος κατά το χρονικό διάστημα που φυσάει πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας ή γενικότερα πάνω από κάθε υδάτινη επιφάνεια μεταφέρει στο νερό ένα μέρος από την ενέργειά του. Η μεταφορά αυτή ενέργειας γίνεται μέσω συνεκτικών δυνάμεων και δυνάμεων κάθετης πίεσης στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο ρευστών και έχει σαν συνέπεια τη δημιουργία επιφανειακών κυματισμών στο νερό. Σε αντίθεση με την εύκολη περιγραφή της επιφάνειας ενός απλού κύματος βαρύτητας, η μορφή της επιφάνειας των κυμάτων ανέμου δεν παρουσιάζει καμία κανονικότητα, αλλά μεταβάλλεται συνεχώς τοπικά και χρονικά, με αποτέλεσμα να είναι αδύνατο να περιγράψουμε με τις συνηθισμένες αναλυτικές και προσδιοριστικές μεθόδους τα κύματα ανέμου (wind waves).

Οι θαλάσσιοι κυματισμοί που προκαλεί ο άνεμος είναι μόνο μία από τις αιτίες παραμόρφωσης της επιφάνειας της θάλασσας. Άλλοι κυματισμοί οφείλονται σε φαινόμενα βαρύτητας και περιστροφής της γης (παλίρροιες, άμπωτης και πλημμύρες), σε σεισμούς (tsunamis) και γεωφυσικά φαινόμενα. Επειδή όμως οι συχνότητες των θαλάσσιων κυματισμών που δεν προκαλούνται άμεσα από τον άνεμο είναι πολύ μικρές, το πλοίο αποκρίνεται ψευδοστατικά (quasi-static) σ' αυτούς και συνεπώς οι κυματισμοί αυτοί δεν προκαλούν δυναμική συμπεριφορά του πλοίου. Από την πλευρά των μεγάλων συχνοτήτων έχουμε τα τριχοειδή κύματα (capillary waves) που προκαλούνται όταν ο άνεμος αρχίζει να φυσά πάνω από μία ήρεμη έκταση και στο σχηματισμό τους παίζει ρόλο η επιφανειακή τάση. Επειδή έχουν πολύ μικρό ύψος και μήκος δεν προκαλούν δυναμική συμπεριφορά του πλοίου (Ρούσσο, 2007).

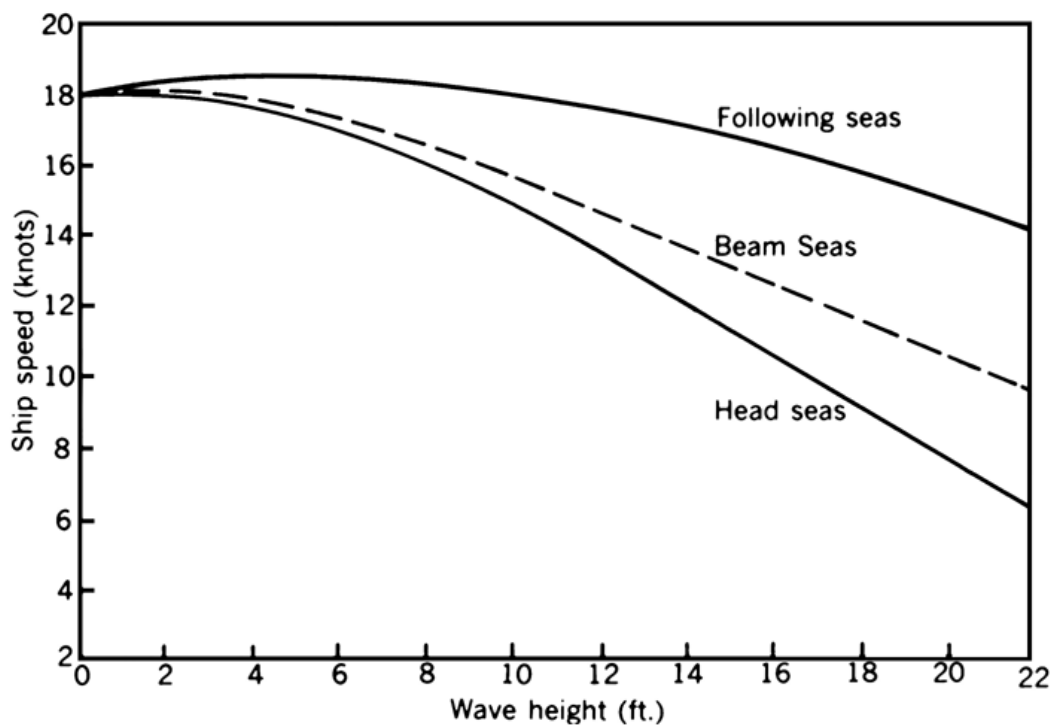
Τους θαλάσσιους κυματισμούς ανέμου που προκαλούν τη δυναμική συμπεριφορά του πλοίου, χωρίζουμε σε δύο κατηγορίες: τις θάλασσες (seas) και τις φουσκοθαλασσιές (swells). Ο σχηματισμός κυματισμών των δύο αυτών κατηγοριών ρυθμίζεται από τις δυνάμεις βαρύτητας. Όταν η επίδραση του ανέμου εξακολουθεί να εξασκείται πάνω στους κυματισμούς, λέμε ότι έχουμε «θάλασσα» και όταν οι κυματισμοί έχουν απομακρυνθεί από την περιοχή της ατμοσφαιρικής διέγερσης, λέμε ότι έχουμε «φουσκοθαλασσιά».

5.4.2 Απομείωση ταχύτητας πλοίου λόγω κυματισμών

Κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού στη θάλασσα η ταχύτητα ενός πλοίου μπορεί να μειωθεί. Η μείωση αυτή μπορεί να είναι **εκούσια** (voluntary speed loss) ή **ακούσια** (involuntary speed loss). Η ακούσια μείωση της ταχύτητας οφείλεται στην πρόσθετη αντίσταση λόγω κυματισμού, ανέμου και μείωσης της διατιθέμενης ισχύς της κυρίας μηχανής λόγω των κινήσεων του πλοίου και του αυξημένου φορτίου στην έλικα (Περδικάρη, 2006). Η ηθελημένη μείωση της ταχύτητας γίνεται μετά από εντολή του καπετάνιου όταν φαινόμενα όπως η διαβροχή του καταστρώματος (deck wetness), η σφυρόκρουση πλώρας (bow slamming) καθώς και άλλα θέτουν σε κίνδυνο τόσο τους επιβάτες και το πλήρωμα όσο και το φορτίο και την ίδια τη βιωσιμότητα του πλοίου. Για τα περισσότερα εμπορικά πλοία η αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς τους έγκειται στην ικανότητα διατήρησης της ταχύτητας κανονικής λειτουργίας σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Η διατήρηση αυτής της ταχύτητας συνεπάγεται την ασφαλή και έγκαιρη μεταφορά του πληρώματος και του φορτίου, για προκαθορισμένο δρομολόγιο. Ο καπετάνιος προκειμένου να διασφαλίσει το πλοίο και την αποστολή του προβαίνει σε ηθελημένη μείωση της ταχύτητας όταν οι αποκρίσεις του πλοίου σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες υπερβαίνουν κάποια όρια. Τέτοια όρια αφορούν κυρίως στο χρόνο που λαμβάνει χώρα η διαβροχή του καταστρώματος καθώς και η σφυρόκρουση (Sen & Padhy, 2010).

Ο προσδιορισμός της μείωσης της ταχύτητας του πλοίου, λόγω των καιρικών συνθηκών δεν αποτελεί εύκολη υπόθεση. Σε ασθενείς ανέμους (με ταχύτητα μικρότερη των 20 κόμβων), τα πλοία χάνουν ταχύτητα σε περίπτωση που οι κυματισμοί είναι αντίθετοι της κατεύθυνσης του πλοίου (head seas), ενώ η ταχύτητα τους αυξάνει ελαφρώς όταν οι κυματισμοί είναι ομόρροποι με την κατεύθυνσή του (following seas). Για μεγαλύτερης έντασης ανέμους, ανεξάρτητα τη φορά των κυματισμών, η ταχύτητα του πλοίου μειώνεται. Αυτό οφείλεται στην αυξημένη δράση των κυμάτων, ακόμα και στην περίπτωση της ομόρροπης με το πλοίο κατεύθυνσής τους, αφού επιδρούν στην αύξηση της αντίστασης που εκδηλώνεται σε αυτό από τις συνεχείς διορθώσεις πορείας, υποδηλώνοντας με αυτό τον τρόπο τη σημασία των θαλάσσιων συνθηκών στην απόδοση του πλοίου. Σημαντικός παράγοντας αποτελεί επίσης και η κατάσταση φόρτωσης (είδος, επιφάνεια και όγκος φόρτωσης) του πλοίου. Ισχυροί άνεμοι έχουν μεγαλύτερες επιπτώσεις σε ένα μεγάλο, πλήρως έμφορτο πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων ή σε πλοίο μεταφορέα

αυτοκινήτων σε σχέση με ένα πλήρως έμφορτο δεξαμενόπλοιο (tanker) του ίδιου μήκους. Αυτή η επίδραση είναι πιο εμφανής, συνήθως κατά τη διαδικασία προσέγγισης του πλοίου στο λιμένα, καθώς και στην περίπτωση που πνέουν άνεμοι κάθετοι στην πορεία του πλοίου (beam seas) για εκτεταμένο χρονικό διάστημα. (The American Practical Navigator, 2002). Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι καμπύλες απόδοσης πλοίου (speed performance curves), οι οποίες χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ταχύτητας του εκάστοτε πλοίου, ανάλογα με τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, υποδηλώνουν την επίδραση όλων των παραπάνω περιπτώσεων ανεμολογικής κατάστασης στην τελική ταχύτητα του πλοίου, σε συσχετισμό με διάφορες τιμές του ύψους κύματος. Βέβαια, κάθε πλοίο διαθέτει διαφορετική καμπύλη απόδοσης, η οποία εξαρτάται από τον τύπο γάστρας του πλοίου, το μήκος του, το σχήμα του, την ισχύ του καθώς και τη χωρητικότητά του (tonnage). Το σχήμα παρουσιάζει την καμπύλη ταχύτητας εμπορικού πλοίου με ταχύτητα λειτουργίας 18 κόμβων:



Σχήμα 5.5 Καμπύλες απόδοσης πλοίου ανάλογα με τον προσανατολισμό του ανέμου Πηγή: The American Practical Navigator (2002)

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναζητήθηκε εκείνη η μαθηματική σχέση βάσει της οποίας, θα μπορούσε να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση του

ανέμου στην ταχύτητα του πλοίου, ώστε παράλληλα να γίνει δυνατή και η χάραξη της καμπύλης συνολικής απόδοσης του πλοίου αναφοράς. Για αυτό το λόγο θα χρησιμοποιηθεί μία ημιεμπειρική σχέση, η οποία μπορεί να αποδώσει τη μείωση ταχύτητας του πλοίου λόγω συνδυασμένης δράσης κυμάτων και ανέμων με προσεγγιστική ακρίβεια. Μία τέτοια εξίσωση διατυπώθηκε από τους Townsin & Kwon (Kwon, 1981), για διάφορους τύπους πλοίων. Για την περίπτωση των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (containerships), η σχέση λαμβάνει την εξής μορφή:

$$\frac{\Delta V}{V} = 0,7 * BN + \frac{BN^{6,5}}{22 * \nabla^{\frac{2}{3}}} \quad (5.4)$$

Όπου, οι μεταβλητές επεξηγούνται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.3 Επεξήγηση μεταβλητών εξίσωσης Townsin & Kwon (1983)

Συμβολισμός	Περιγραφή-Ερμηνεία μεταβλητής
$\frac{\Delta V}{V}$	μείωση ταχύτητας λόγω δράσης κυμάτων και ανέμων
V	ταχύτητα λειτουργίας πλοίου
BN	ένταση ανέμου στην κλίμακα Beaufort
∇	όγκος εκτοπίσματος ύδατος λόγω του πλοίου (m ³)

Σύμφωνα με τους Townsin & Kwon, η συγκεκριμένη εξίσωση παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά στην εκτίμηση της ακούσιας μείωσης ταχύτητας πλοίου (involuntary speed loss), χρησιμοποιούμενη κυρίως για πρακτικούς σκοπούς. Βασίζεται στον υπολογισμό της συνολικής πρόσθετης αντίστασης και της απαιτούμενης αύξησης της ισχύος λόγω των κυμάτων, ανάλογα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πλοίου. Η απόμειωση της ταχύτητας, όπως εκφράζεται από το λόγο $\frac{\Delta V}{V}$, αφορά στη δυσμενέστερη περίπτωση διεύθυνσης του ανέμου, δηλαδή αντίρροπα της κατεύθυνσης του πλοίου (head seas). Η παραδοχή της αντίρροπης διεύθυνσης του ανέμου ισχύει και για το υπό εξέταση δίκτυο δρομολόγησης, ώστε η πρόβλεψη των χρόνων διαδρομής να εντάσσεται στο δυσμενέστερο, από ανεμολογικής άποψης, πλαίσιο. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται αναλυτικά η μείωση ταχύτητας πλοίου σε συνάρτηση με την ταχύτητα του ανέμου, βάσει της παραπάνω εξίσωσης για πλοίο με όμοια τεχνικά χαρακτηριστικά με το πλοίο αναφοράς του υπό εξέταση προβλήματος:

Πίνακας 5.4 Απώλεια ταχύτητας πλοίου σύμφωνα με τον τύπο Townsin & Kwon (1983)

V(m/sec)	BN	ΔV/V (%)
0,00	0,00	0,00
1,00	1,13	0,79
2,00	1,79	1,25
3,00	2,34	1,66
4,00	2,84	2,04
5,00	3,29	2,45
6,00	3,72	2,92
7,00	4,12	3,50
8,00	4,51	4,25
9,00	4,88	5,24
10,00	5,23	6,54
11,00	5,57	8,25
12,00	5,91	10,48
13,00	6,23	13,33
14,00	6,55	16,95
15,00	6,85	21,48
16,00	7,15	27,08
17,00	7,45	33,91
18,00	7,74	42,18

Η πρώτη στήλη παρουσιάζει την ταχύτητα του ανέμου σε m/sec ενώ η δεύτερη την ένταση του ανέμου στην κλίμακα Beaufort. Οι βαθμοί της κλίμακας συσχετίζονται με την ταχύτητα του ανέμου σύμφωνα με την παρακάτω εμπειρική σχέση:

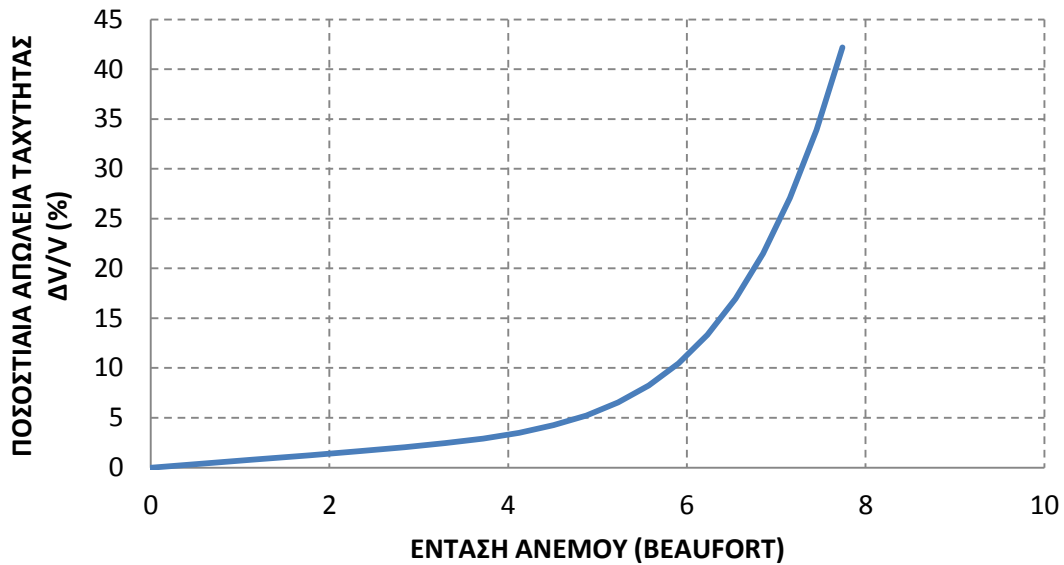
$$V_{[m/sec]} = 0,836 * BN^{\frac{3}{2}} \quad (5.5)$$

Όπου,

Πίνακας 5.5 Επεξήγηση μεταβλητών της ημπεμπειρικής σχέσης (5.5)

Συμβολισμός	Περιγραφή-Ερμηνεία μεταβλητής
V	η ταχύτητα του ανέμου σε m/sec
BN	η ένταση του ανέμου σε βαθμούς της κλίμακας Beaufort

Διαγραμματικά, η απώλεια της ταχύτητας αποτυπώνεται παρακάτω:



Σχήμα 5.5 Μείωση ταχύτητας σε συνάρτηση με την ένταση του ανέμου

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, η απώλεια ταχύτητας για χαμηλή ένταση του ανέμου είναι σχεδόν αμελητέα ($BN \leq 4$), ενώ για μεγαλύτερες τιμές της έντασης ο ρυθμός μείωσης της ταχύτητας αυξάνει σημαντικά ($BN \geq 6$). Για τιμές έντασης ιδιαίτερα υψηλές ($BN \geq 8$), η ταχύτητα, βάσει της ημιεμπειρικής φόρμουλας, μειώνεται απότομα και έντονα, αφού η επίδραση των κυμάτων είναι κυρίαρχη σε σύγκριση με την επίδραση του ανέμου. Βέβαια, η ακούσια απώλεια ταχύτητας είναι λιγότερο σημαντική σε αυτό το εύρος τιμών σε σχέση με την εκούσια απώλεια ταχύτητας, που εφαρμόζει ο καπετάνιος του πλοίου για λόγους ασφαλείας και για αυτό το λόγο δεν υπολογίζεται η απώλεια ταχύτητας σύμφωνα με τους Townsin & Kwon (1983) για πεδίο τιμών ταχύτητας ανέμου πάνω από 18 m/sec. Σε αυτό το πεδίο, υπερτερεί η εκούσια απώλεια που, όπως σημειώθηκε, είναι δύσκολο να καθοριστεί εκ των προτέρων το ύψος της, δεδομένων των ιδιαιτεροτήτων της κάθε περίπτωσης.

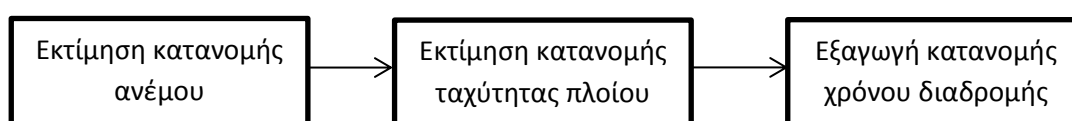
5.5 Εκτίμηση πιθανοτικής κατανομής για τους χρόνους διαδρομής

Όπως έχει επισημανθεί και στο κεφάλαιο της περιγραφής, βασικό χαρακτηριστικό του εξεταζόμενου προβλήματος αποτελεί ο στοχαστικός χαρακτήρας των χρόνων διαδρομής. Δεν θεωρούνται δηλαδή ντετερμινιστικοί, αλλά λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των καιρικών συνθηκών στον καθορισμό του απαιτούμενου χρόνου ταξιδιού. Γενικά, ο ο χρόνος διαδρομής ανάμεσα σε δύο κόμβους, ανεξάρτητα τη φύση του προβλήματος, υπολογίζεται από τον κάτωθι τύπο:

$$t_{ij} = \frac{D_{ij}}{V_{ij}} \quad (5.6)$$

Όπου, i είναι ο κόμβος προέλευσης, j ο κόμβος προορισμού, t_{ij} ο χρόνος διαδρομής μεταξύ i, j , D_{ij} η απόσταση μεταξύ των i, j , V_{ij} η ταχύτητα λειτουργίας του πλοίου στη διαδρομή i, j .

Ενώ στο ντετερμινιστικό πρόβλημα, η ταχύτητα λειτουργίας θεωρείται σταθερή και μπορεί να καθοριστεί εκ των προτέρων, δε μπορεί να θεωρηθεί το ίδιο στην περίπτωση της στοχαστικής δρομολόγησης όπου η ταχύτητα του πλοίου είναι άμεσα εξαρτώμενη από τις καιρικές συνθήκες, με τον τρόπο που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ως εκ τούτου, η ταχύτητα δε μπορεί να λάβει μία τιμή αλλά ακολουθεί μία κατανομή πυκνότητας πιθανότητας. Φυσικό επακόλουθο και ο χρόνος διαδρομής μεταξύ δύο κόμβων να μη λαμβάνει μία σταθερή τιμή, αλλά να διαφοροποιείται σύμφωνα με ένα πιθανοτικό πρότυπο. Η κατανομή αυτή δεν είναι εκ των προτέρων γνωστή μιας και εξαρτάται από τον πολύπλοκο μηχανισμό αλληλεπίδρασης ανέμου-πλοίου αφενός, αφετέρου σχετίζεται με τα κατά τόπους μεταβαλλόμενα ανεμολογικά χαρακτηριστικά. Λαμβάνοντας υπόψη τόσο την κατανομή Weibull για την περιγραφή του ανεμολογικού προφιλ της κάθε περιοχής, όσο και την ημιεμπειρική σχέση των Townsin & Kwon(1983) για την επίδραση των ανέμων στην ταχύτητα του πλοίου, θα εφαρμοστεί μία διαδικασία προσέγγισης της κατανομής της ταχύτητας του πλοίου και κατ' επέκταση του χρόνου διαδρομής μεταξύ 2 κόμβων του δικτύου. Η βασική λογική αυτής της αναλυτικής διαδικασίας συνίσταται στο τρίπτυχο:



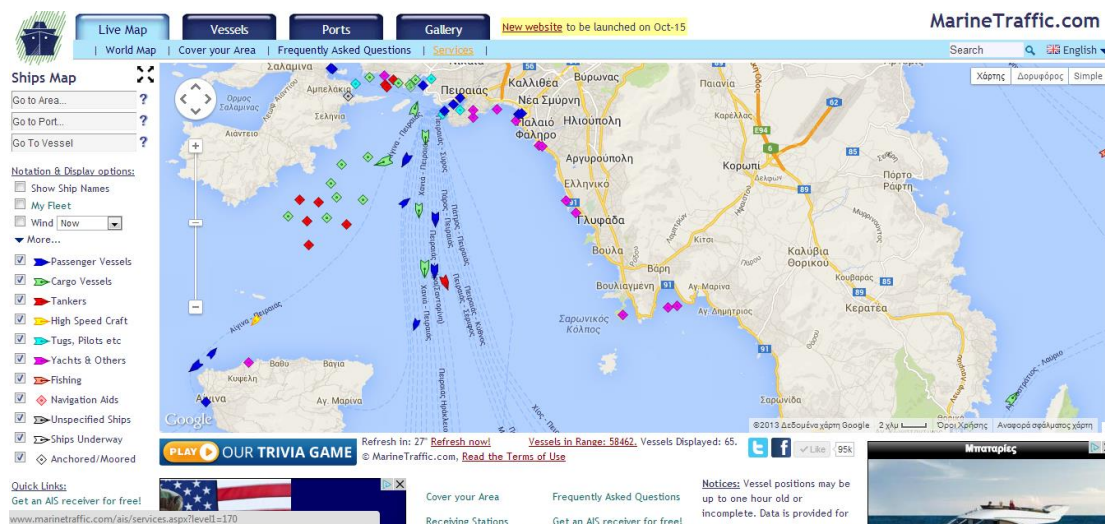
Σχήμα 5.6 Διαδικασία εξαγωγής κατανομής χρόνου διαδρομής

Τα επιμέρους στάδια αυτής της διαδικασίας περιγράφονται ως εξής:

5.5.1 Γεωγραφική αποτύπωση της διαδρομής

Είναι ήδη γνωστό, ότι τα στατιστικά χαρακτηριστικά του ανέμου διαφέρουν σε τοπικό επίπεδο, με αποτέλεσμα κατά τη διάρκεια της διαδρομής ενός πλοίου να μην είναι δυνατή η απευθείας εκτίμηση των ανεμολογικών συνθηκών της διαδρομής, αλλά απαιτείται ο προσδιορισμός του τρόπου και του βαθμού συνεισφοράς του κάθε επιμέρους τμήματος της διαδρομής στο συνολικό ανεμολογικό προφίλ. Για αυτό το λόγο, θέτοντας ως μονάδα μελέτης την κάθε πιθανή ακμή του δικτύου, δηλαδή τη διαδρομή μεταξύ κάθε ζεύγους προέλευσης-προορισμού, ερευνάται επι χάρτου η εφικτή θαλάσσια διαδρομή. Αφού καθοριστεί η θαλάσσια διαδρομή συσχετίζεται με τον κάρναβο ανεμολογικών παραμέτρων, που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα.

Η εύρεση της θαλάσσιας διαδρομής γίνεται με τη βοήθεια της τεχνολογίας AIS (Automatic Identification System), η οποία χρησιμοποιείται στο λογισμικό MarineTraffic. Το λογισμικό MarineTraffic είναι ελεύθερο στο διαδίκτυο και παρέχει πληροφορίες πραγματικού χρόνου για τα λιμάνια και τις κινήσεις των πλοίων. Για κάθε ζεύγος προέλευσης-προορισμού, με τη βοήθεια του λογισμικού, εντοπίζεται η θαλάσσια διαδρομή που ακολουθείται σε πραγματικές συνθήκες είτε από τα επιβατηγά είτε από τα εμπορικά πλοία, που την έχουν ενσωματώσει στο δρομολόγιό τους.



Σχήμα 5.7 Άποψη του λογισμικού Marine Traffic

Στη συνέχεια, αντιστοιχίζεται η διαδρομή που εντοπίστηκε (στην παραπάνω εικόνα με τη μπλε διακεκομμένη παρουσίαζονται όλες οι διαδρομές που ξεκινούν από το λιμάνι του

Πειραιά) με τα τμήματα του κανάβου ανεμολογικών παραμέτρων, δηλαδή καταγράφεται από πόσα και από ποια τμήματα του κανάβου διέρχεται το πλοίο κατά την εκτέλεση αυτού του δρομολογίου. Επίσης, εκτιμάται χονδροειδώς το ποσοστό συμβολής του κάθε τμήματος του κανάβου στη συνολική διαδρομή. Φυσικά, το άθροισμα των επιμέρους ποσοστών ισούται με τη μονάδα. Τόσο η διαδρομή όσο και το ποσοστό συμβολής εκτιμώνται με καθαρά οπτικό κριτήριο, για αυτό αποτελούν προσέγγιση και σε καμία περίπτωση ακριβή υπολογισμό. Απότοκο αυτής της διαδικασίας η καταγραφή των γεωγραφικών τμημάτων από τα οποία διέρχεται κάθε ακμή του εξεταζόμενου δικτύου και ο προσδιορισμός του συντελεστής συμμετοχής του κάθε τμήματος στη διαδρομή.

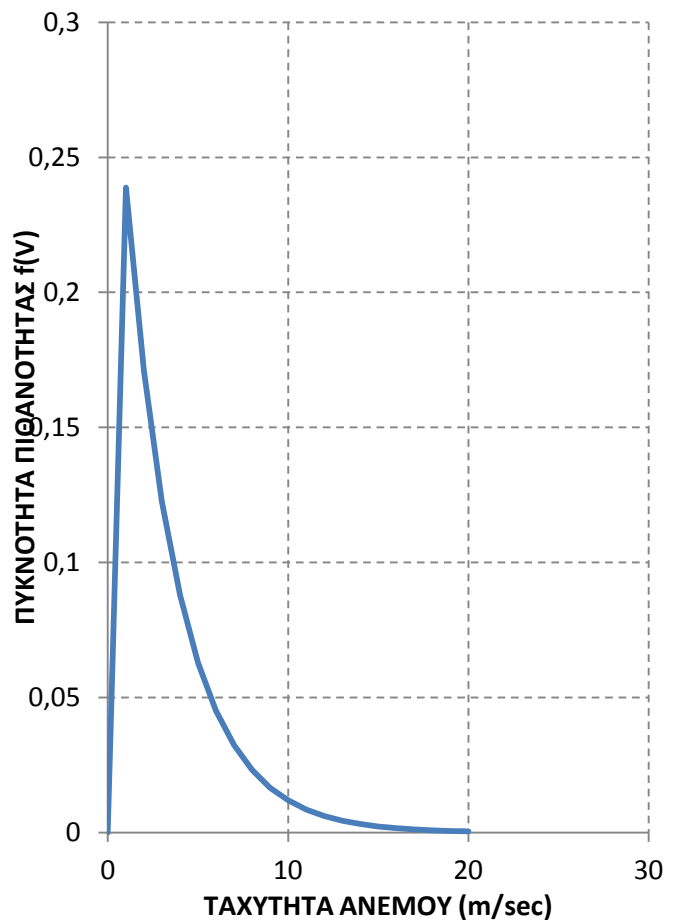
5.5.2 Υπολογισμός κατανομής πυκνότητας-πιθανότητας ταχύτητας ανέμου για κάθε επιμέρους τμήμα της διαδρομής

Από το προηγούμενο στάδιο προσδιορίστηκαν τα γεωγραφικά τμήματα από τα οποία διέρχεται κάθε σύνδεση ζεύγους προέλευσης-προορισμού. Σε αυτό το στάδιο συσχετίζεται το κάθε τμήμα με τα ανεμολογικά του χαρακτηριστικά. Πιο συγκεκριμένα, βάσει της κωδικής του ονομασίας, κάθε τμήμα λαμβάνει τις προκαθορισμένες τιμές των παραμέτρων Weibull, όπως αυτές διατυπώνονται στον πίνακα των ομοιογενών ανεμολογικών ζωνών που διαμορφώθηκαν παραπάνω (Πίνακας 5.2). Με τη βοήθεια των παραμέτρων αυτών είναι δυνατόν να καταρτιστεί για κάθε ζώνη, η στατιστική περιγραφή των ανεμολογικών συνθηκών, ακολουθώντας το πιθανοτικό πρότυπο Weibull. Κατά αυτόν τον τρόπο, διαμορφώνεται για κάθε επιμέρους τμήμα η κατανομή πυκνότητας-πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου.

Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ενδεικτικά διάφορες τιμές της ταχύτητας του ανέμου καθώς και η πιθανότητα εμφάνισης τους, στο τμήμα 2.5 του ανεμολογικού κανάβου ($k=1$, $C=3$). Το διάγραμμα παρουσιάζει σχηματικά την κατανομή πυκνότητας-πιθανότητας της ταχύτητας.

Πίνακας 5.6 Πιθανότητα εμφάνισης για διάφορες ταχύτητες ανέμου

V (m/sec) (Στήλη 1)	V(beaufort) (Στήλη 2)	f(V) (Στήλη 3)	F(V) (Στήλη 4)
0	0	0	0
1	1,12684059	0,23884377	0,283469
2	1,78874794	0,17113904	0,486583
3	2,34392288	0,12262648	0,632121
4	2,83946035	0,087865713	0,736403
5	3,29490187	0,062958534	0,811124
6	3,72074564	0,045111761	0,864665
7	4,1234542	0,032323989	0,903028
8	4,50736235	0,02316115	0,930517
9	4,87555606	0,016595689	0,950213
10	5,23033069	0,011891331	0,964326
11	5,57345208	0,008520511	0,974438
12	5,90631555	0,006105213	0,981684
13	6,23004786	0,004374576	0,986876
14	6,54557553	0,003134521	0,990596
15	6,85367208	0,002245982	0,993262
16	7,15499174	0,001609317	0,995172
17	7,45009418	0,001153126	0,996541
18	7,73946282	0,000826251	0,997521



Σχήμα 5.8 Κατανομή τχύτητας ανέμου για τη ζώνη 2.5

Στον παραπάνω πίνακα εμφανίζεται στην πρώτη στήλη η ταχύτητα του ανέμου σε m/sec, στη δεύτερη στήλη η ένταση του ανέμου στην κλίμακα Beaufort, στην τρίτη στήλη η πιθανότητα εμφάνισης κάθε τιμής ταχύτητας του ανέμου, ενώ στην τελευταία στήλη προσδιορίζεται υπολογίζεται η αθροιστική πιθανότητα. Τα ίδια στοιχεία καταγράφονται για κάθε τμήμα της διαδρομής.

5.5.3 Εκτίμηση συνολικής κατανομής της ταχύτητας του ανέμου για το ζεύγος προέλευσης-προορισμού

Μετά τον υπολογισμό της κατανομής πυκνότητας-πιθανότητας για κάθε επιμέρους τμήμα της διαδρομής μεταξύ προέλευσης-προορισμού, απαιτείται ο προσδιορισμός της γενικής κατανομής του ανέμου ανά διαδρομή. Ο προσδιορισμός αυτός επιτυγχάνεται συνεκτιμώντας τα προφίλ των επιμέρους τμημάτων καθώς και το ποσοστό συμμετοχής του

κάθε τμήματος στη διαδρομή μεταξύ του ζεύγους των κόμβων. Το ποσοστό συμβολής κάθε τμήματος πολλαπλασιάζεται με την πιθανότητα εμφάνισης $f(V)$ (Στήλη 3 του προηγούμενου πίνακα) και τα επιμέρους γινόμενα συνιστούν τη γενική κατανομή του ανέμου για τη θαλάσσια σύνδεση του υπό εξέταση ζεύγους κόμβων. Η νέα $f'(V)$ δηλαδή προκύπτει ως γραμμικός συνδυασμός των επιμέρους $f(V)$ με τα αντίστοιχα ποσοστά συμμετοχής:

$$f'(V) = a_1 * f_1(V) + a_2 * f_2(V) + \dots + a_n * f_n(V) \quad (5.7)$$

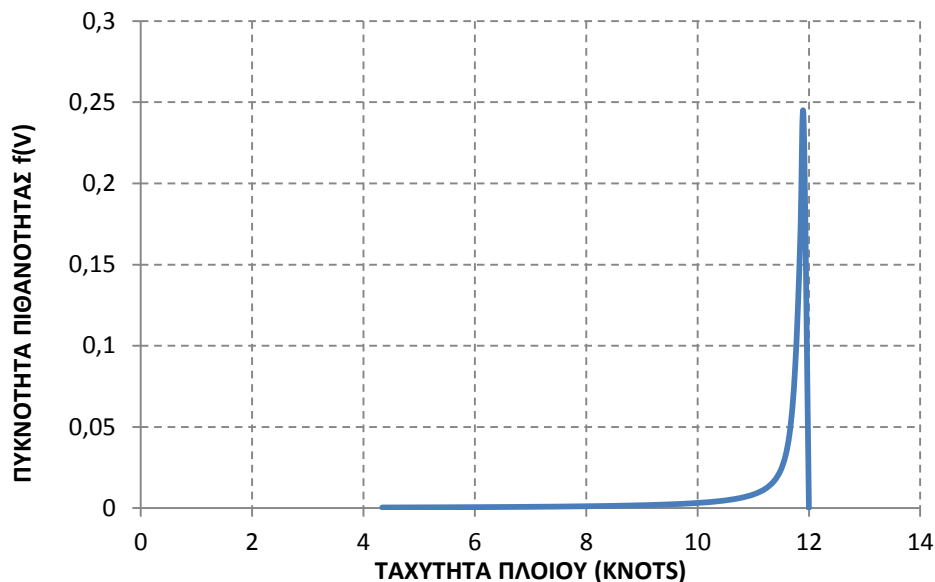
Όπου: a_i είναι το ποσοστό συμβολής του κάθε τμήματος ενώ $f_i(V)$ η πυκνότητα πιθανότητας κάθε τμήματος.

5.5.4 Προσδιορισμός της απώλειας ταχύτητας και εκτίμηση της συνολικής κατανομής ταχύτητας πλοίου

Δεδομένου ότι έχει προσδιοριστεί η κατανομή που ακολουθεί η ταχύτητα του ανέμου στη διαδρομή μεταξύ δύο λιμένων, σε αυτό το επίπεδο πραγματοποιείται η μετάβαση από την κατανομή του ανέμου στην κατανομή της ταχύτητας του πλοίου. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, η επίδραση του ανέμου στην ταχύτητα του πλοίου είναι μια δυναμική διαδικασία, η οποία στα πλαίσια αυτής της εργασίας περιγράφεται από τη προσεγγιστική σχέση των Townsin & Kwon (1983). Επομένως, για τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα στάδια της διαδικασίας, υπολογίζεται η ποσοστιαία απώλεια ταχύτητας. Θέτοντας μία αρχική τιμή ταχύτητας λειτουργίας του πλοίου, η οποία εξαρτάται αμιγώς από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πλοίου αναφοράς, υπολογίζεται η τελική ταχύτητα του πλοίου για κάθε ενδεχόμενο έντασης του ανέμου. Καθώς υπεισέρχεται και η κατανομή πυκνότητας-πιθανότητας του ανέμου εύκολα προσδιορίζεται και η συνολική κατανομή της ταχύτητας του πλοίου. Στο ίδιο μοτίβο με το προηγούμενο παράδειγμα, κατά την εφαρμογή της διαδικασίας για ένα ζεύγος προέλευσης-προορισμού προστίθενται οι στήλες 5,6,7. Το παράδειγμα αφορά τη σύνδεση μεταξύ δύο κόμβων προέλευσης-προορισμού, με παραδοχή αρχικής ταχύτητας λειτουργίας πλοίου, τους 12 κόμβους/ώρα:

Πίνακας 5.7 Πιθανότητα εμφάνισης διαφόρων τιμών ταχύτητας πλοίου

V(m/sec) (Στήλη 1)	V(beaufort) (Στήλη 2)	f(V) (Στήλη 3)	F(V) (Στήλη 4)	Αρχική ταχύτητα (knots) (Στήλη 5)	Απώλεια ταχύτητας (%) (Στήλη 6)	Τελική ταχύτητα (knots) (Στήλη 7)
0	0,0000	0,0000	0,0000	12,0000	0,0000	12,0000
1	1,1268	0,0980	0,0633	12,0000	0,7889	11,9053
2	1,7887	0,1300	0,1798	12,0000	1,2548	11,8494
3	2,3439	0,1384	0,3156	12,0000	1,6564	11,8012
4	2,8395	0,1318	0,4516	12,0000	2,0419	11,7550
5	3,2949	0,1164	0,5762	12,0000	2,4492	11,7061
6	3,7207	0,0971	0,6832	12,0000	2,9192	11,6497
7	4,1235	0,0772	0,7703	12,0000	3,5001	11,5800
8	4,5074	0,0589	0,8382	12,0000	4,2498	11,4900
9	4,8756	0,0434	0,8891	12,0000	5,2365	11,3716
10	5,2303	0,0308	0,9259	12,0000	6,5401	11,2152
11	5,5735	0,0213	0,9518	12,0000	8,2524	11,0097
12	5,9063	0,0143	0,9693	12,0000	10,4781	10,7426
13	6,2300	0,0093	0,9809	12,0000	13,3348	10,3998
14	6,5456	0,0059	0,9884	12,0000	16,9539	9,9655
15	6,8537	0,0037	0,9931	12,0000	21,4809	9,4223
16	7,1550	0,0022	0,9960	12,0000	27,0753	8,7510
17	7,4501	0,0013	0,9977	12,0000	33,9117	7,9306
18	7,7395	0,0008	0,9987	12,0000	42,1797	6,9384



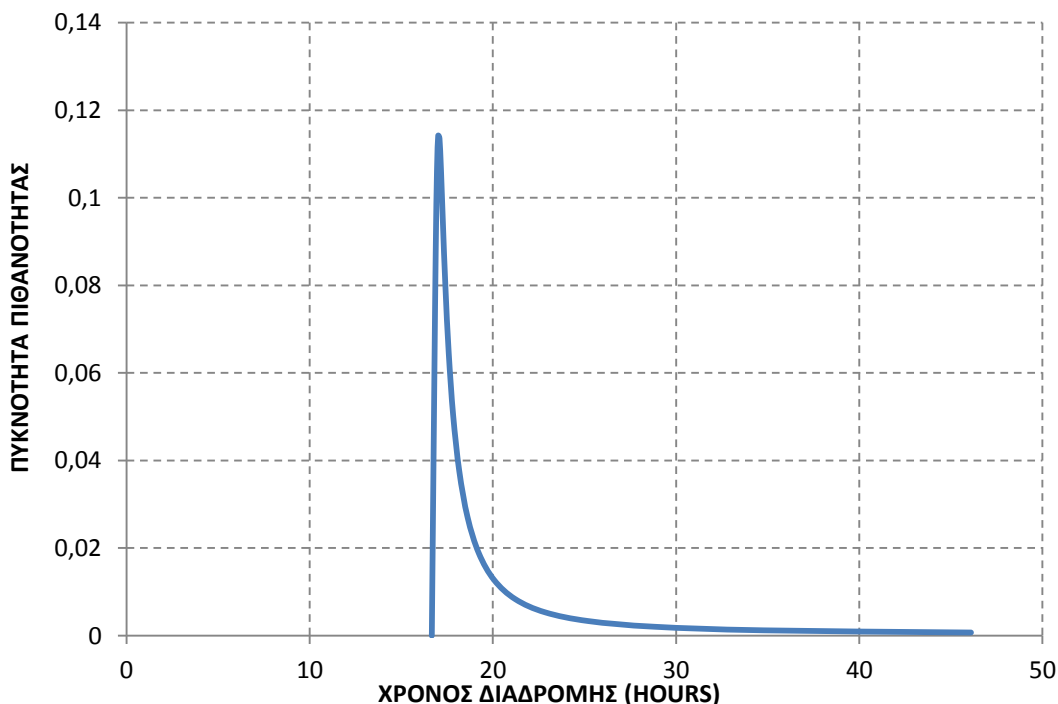
Σχήμα 5.9 Σχηματική μορφή πιθανοτικής κατανομής ταχύτητας πλοίου

Η Στήλη 5 παρουσιάζει την αρχική ταχύτητα λειτουργίας του πλοίου (που αντιστοιχεί για ένταση ανέμου 0 Beaufort), η Στήλη 6 παρουσιάζει την απώλεια ταχύτητας όπως αυτή

υπολογίστηκε από τον υιοθετούμενη προσεγγιστική σχέση και η Στήλη 7 την τελική ταχύτητα του πλοίου για κάθε πιθανότητα εμφάνισης.

5.5.5 Εξαγωγή τελικής κατανομής χρόνου διαδρομής για το ζεύγος προέλευσης προορισμού

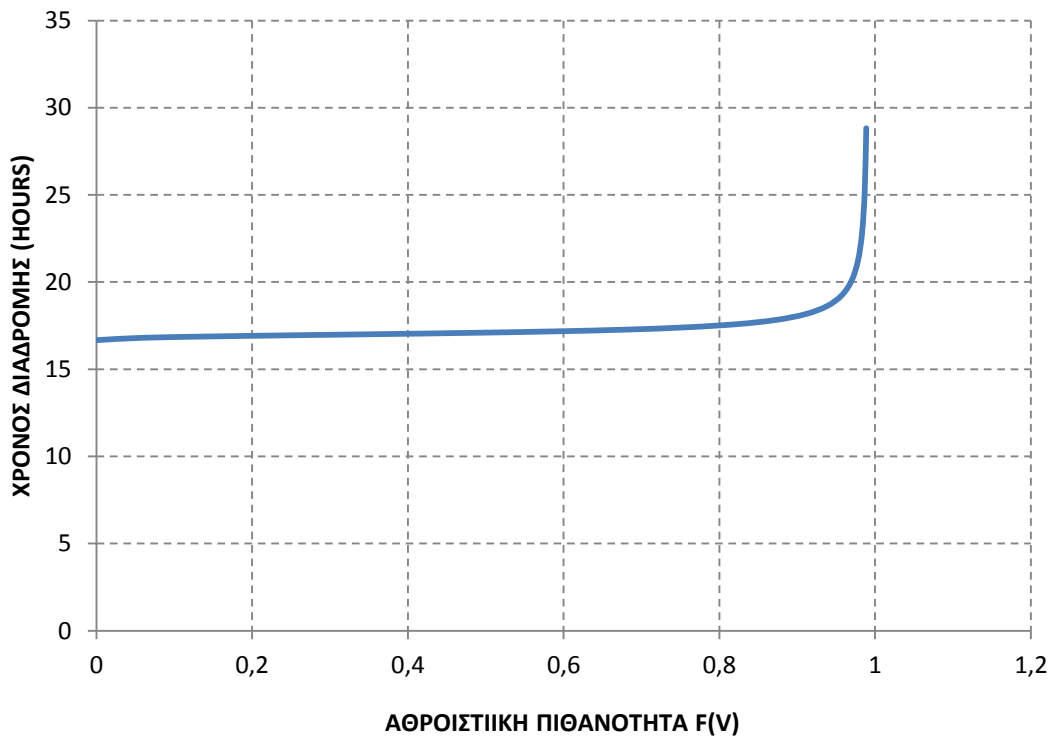
Αφού έχει εκτιμηθεί η πιθανοτική κατανομή της ταχύτητας του πλοίου, είναι δυνατός ο προσδιορισμός της τελικής κατανομής του χρόνου διαδρομής για το ζεύγος προέλευσης-προορισμού. Βάσει του τύπου $t_{ij} = \frac{D_{ij}}{v_{ij}}$, εισάγεται η απόσταση μεταξύ του αρχικού και τελικού κόμβου σε ναυτικά μίλια και υπολογίζεται ο χρόνος ταξιδιού για κάθε τιμή της επικρατούσας ταχύτητας ανέμου με την αντίστοιχη πιθανότητα. Τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας, η εξαγωγή της κατανομής πυκνότητας-πιθανότητας του αναμενόμενου χρόνου διαδρομής, η οποία αποτελεί και τον αντικατοπτρισμό της στοχαστικής θεώρησης του προβλήματος. Σχηματικά, η κατανομή αυτή, για μία τυχαία σύνδεση ζεύγους, απεικονίζεται στο παρακάτω γράφημα:



Σχήμα 5.10 Πιθανοτική κατανομή χρόνου διαδρομής για ένα ζεύγος προέλευσης-προορισμού

Όπως είναι αναμενόμενο, η τιμή από την οποία ξεκινά η κατανομή συμπίπτει με το χρόνο διαδρομής για άνεμο έντασης 0 Beaufort, δηλαδή με την ντετερμινιστική τιμή του χρόνου διαδρομής. Κοντά σε αυτή την τιμή συγκεντρώνεται και η πλειοψηφία των πιθανών χρόνων,

κάτι το οποίο απεικονίζεται σαφέστερα και στο διάγραμμα αθροιστικής πιθανότητας-χρόνου διαδρομής:



Σχήμα 5.11 Κατανομή αθροιστικής πιθανότητας χρόνου διαδρομής

Η εξαγωγή της κατανομής των χρόνων διαδρομής για κάθε ζεύγος αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή του προτύπου επίλυσης του προβλήματος. Επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία για κάθε ζεύγος ΠΠ του υπό μελέτη δικτύου, εξάγονται όλες οι κατανομές των χρόνων διαδρομής, οπότε καθίσταται πια δυνατός ο μετασχηματισμός του μεταβαλλόμενου περιορισμού 3.7 του μαθηματικού μοντέλου, από στοχαστικό σε ντετερμινιστικό, εφόσον βέβαια καθοριστούν και οι υπόλοιποι παράμετροί του. Σημειώνεται ότι κατά τη διαδικασία εκτίμησης της πιθανοτικής κατανομής των χρόνων διαδρομής, χρησιμοποιείται το υπολογιστικό περιβάλλον καθώς και τα εργαλεία του λογισμικού Microsoft Excel.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΑΙΓΑΙΟ ΠΕΛΑΓΟΣ

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει την εφαρμογή του αναπτυχθέντος αλγορίθμου σε ένα δίκτυο νησιών του Αιγαίου πελάγους. Παρουσιάζεται η βέλτιστη εξαγόμενη δρομολόγηση, ερμηνεύονται τα επιμέρους αποτελέσματα ενώ πραγματοποιείται και ανάλυση ευαισθησίας του αλγορίθμου, προκειμένου να διαπιστωθεί η ευρωστία του υπό συνθήκες πολλαπλών μεταβολών των βασικών παραμέτρων.

6.1 Εισαγωγή

Το πρόβλημα της δρομολόγησης πλοίων μεταφοράς μικρών εμπορευματοκιβωτίων με ταυτόχρονη παραλαβή και επίδοση εμπορευμάτων, με χρονικά όρια άφιξης στους λιμένες και με στοχαστικούς χρόνους διαδρομής (STT-VRPSPDTD), όπως διατυπώθηκε και μοντελοποιήθηκε στις προηγούμενες ενότητες, εφαρμόζεται για ένα δίκτυο νησιωτικών λιμένων του Αιγαίου πελάγους. Σκοπός της παρούσας εφαρμογής, η εύρεση της βέλτιστης δρομολόγησης που θα ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος μεταφοράς. Παράλληλα, αναζητείται και το μέγεθος του στόλου που απαιτείται για την εξυπηρέτηση του δικτύου. Το πρότυπο δρομολόγησης επιλύεται και για εναλλακτικά σενάρια, όπου διαφοροποιούνται βασικές παράμετροι του προβλήματος προκειμένου να προσδιοριστεί η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου καθώς και η ευαισθησία του στις εκάστοτε μεταβολές. Τα ευρήματα από τις παραπάνω εφαρμογές σε συνδυασμό με τεχνικά χαρακτηριστικά της επίλυσης αναλύονται και σχολιάζονται, στο πλαίσιο αξιολόγησης του διαμορφωθέντος μοντέλου ως υποστηρικτικό βοήθημα για ένα σύστημα λήψης αποφάσεων στον τομέα των ναυτιλιακών μεταφορών.

6.2 Το δίκτυο των νησιών στο Αιγαίο πέλαγος

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος εφαρμόζεται για τη δρομολόγηση ενός ομοιογενούς στόλου εμπορικών πλοίων, σε ένα δίκτυο νησιών στο Αιγαίο πέλαγος. Το δίκτυο αυτό απαρτίζεται από 26 νησιωτικούς λιμένες, όπου κατά κανόνα κάθε νησιωτικός λιμένας ταυτίζεται και με ένα νησί του Αιγαίου (έκτος από την περίπτωση της Κρήτης, όπου το δίκτυο περιλαμβάνει δύο λιμένες). Ως κεντρικό λιμάνι του δικτύου και αρχικός κόμβος προέλευσης όλων των

διαδρομών θεωρείται ο εμπορευματικός λιμένας του Πειραιά. Πρώτο μέλημα αποτελεί η αποτύπωση και η απεικόνιση του δικτύου, ώστε να είναι δυνατή η χρήση από τον αλγόριθμο όλων των απαραίτητων γεωγραφικών στοιχείων για τη διαμόρφωση των διαδρομών. Το δίκτυο περιλαμβάνει τα κομβικότερα νησιά, ως προς το μέγεθος και την οικονομική δραστηριότητα, όλων των συμπλεγμάτων του Αιγαίου: Κυκλάδες, Κρήτη, Δωδεκάνησα, νησιά Βορειοανατολικού Αιγαίου. Τα λιμάνια του δικτύου παρουσιάζονται κάτωθι:

Πίνακας 6.1 Οι νησιωτικοί λιμένες που απαρτίζουν το δίκτυο

ID	ΛΙΜΕΝΑΣ	ΝΗΣΙΩΤΙΚΟ ΣΥΜΠΛΕΓΜΑ
1	Ρέθυμνο (RET)	Κρήτη
2	Ηράκλειο (IRA)	Κρήτη
3	Κύθηρα (KIT)	Επτάνησα
4	Μήλος (MIL)	Κυκλάδες
5	Κέα (KEA)	Κυκλάδες
6	Θήρα (THI)	Κυκλάδες
7	Πάρος (PAR)	Κυκλάδες
8	Νάξος (NAX)	Κυκλάδες
9	Σύρος (SYR)	Κυκλάδες
10	Μύκονος (MYK)	Κυκλάδες
11	Τήνος (TIN)	Κυκλάδες
12	Άνδρος (AND)	Κυκλάδες
13	Χίος (CHI)	Βορειοανατολικό Αιγαίο
14	Ικαρία (IKA)	Βορειοανατολικό Αιγαίο
15	Σάμος (SAM)	Βορειοανατολικό Αιγαίο
16	Αστυπάλαια (AST)	Δωδεκάνησα
17	Κάρπαθος (KAR)	Δωδεκάνησα
18	Ρόδος (RHO)	Δωδεκάνησα
19	Κως (KOS)	Δωδεκάνησα
20	Κάλυμνος (KAL)	Δωδεκάνησα
21	Σκύρος (SKY)	Σποράδες
22	Μυτιλήνη (Λέσβος) (MYT)	Βορειοανατολικό Αιγαίο
23	Λήμνος (LIM)	Βορειοανατολικό Αιγαίο
24	Αμοργός (AMO)	Κυκλάδες
25	Σίφνος (SIF)	Κυκλάδες
26	Λέρος (LER)	Δωδεκάνησα

Στην κατεύθυνση του καθορισμού της χωροταξίας του προβλήματος, αρχικά εντοπίζονται οι αποστάσεις μεταξύ των νησιωτικών λιμένων και του κεντρικού της ενδοχώρας (Πειραιάς) σε ναυτικά μίλια. Οι αποστάσεις είναι κρίσιμο στοιχείο της επίλυσης, δεδομένου ότι καθορίζουν το χρόνο διαδρομής αλλά και σχηματίζουν «ενότητες δρομολόγησης» στο

εσωτερικό του δικτύου. Ο παρακάτω πίνακας εμφανίζει όλες τις αποστάσεις των πιθανών ζευγών προέλευσης-προορισμού του δικτύου:

Πίνακας 6.2 Αποστάσεις μεταξύ των λιμένων του δικτύου σε ναυτικά μίλια

	ΠΕΙΡΑΙΑΣ	ΡΕΘΥΜΝΟ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ	ΚΥΘΗΡΑ	ΜΗΛΟΣ	ΚΕΑ	ΘΗΡΑ	ΠΑΡΟΣ	ΝΑΞΟΣ	ΣΥΡΟΣ	ΜΥΚΟΝΟΣ	ΤΗΝΟΣ	ΑΝΔΡΟΣ	ΧΙΟΣ	ΙΚΑΡΙΑ	ΣΑΜΟΣ	ΑΣΤΥΠΑΛΛΙΑ	ΚΑΡΠΑΘΟΣ	ΡΟΔΟΣ	ΚΩΣ	ΚΑΛΥΜΝΟΣ	ΣΚΥΡΟΣ	ΜΥΤΙΛΗΝΗ	ΛΗΜΝΟΣ	ΑΜΟΡΓΟΣ	ΣΙΦΝΟΣ	ΛΕΡΟΣ
ΠΕΙΡΑΙΑΣ		158	174	124	97	50	146	96	103	83	94	86	80	153	143	190	193	287	298	238	219	144	215	221	148	90	200
ΡΕΘΥΜΝΟ	158		38	108	100	165	95	130	136	152	157	162	182	237	194	226	139	177	233	200	186	251	300	330	133	118	195
ΗΡΑΚΛΕΙΟ	174	38		142	109	174	69	126	129	152	152	159	184	227	179	206	115	141	199	171	161	258	289	328	117	122	154
ΚΥΘΗΡΑ	124	108	142		88	122	138	135	154	138	160	153	151	233	211	251	194	251	302	251	234	216	294	306	169	107	210
ΜΗΛΟΣ	97	100	109	88		67	80	49	61	63	73	71	84	153	130	164	113	185	221	166	148	152	216	235	84	17	132
ΚΕΑ	50	165	174	122	67		106	71	83	51	61	49	30	119	133	153	152	229	254	178	160	94	165	166	105	58	150
ΘΗΡΑ	146	95	69	138	80	106		60	50	74	71	81	119	144	99	131	57	128	166	116	100	178	225	247	39	55	90
ΠΑΡΟΣ	96	130	126	135	49	71	60		19	26	28	33	59	109	60	115	79	164	183	124	106	131	172	202	51	30	96
ΝΑΞΟΣ	103	136	129	154	61	83	50	19		35	25	34	67	101	63	104	66	157	171	111	93	135	164	201	40	42	85
ΣΥΡΟΣ	83	152	152	138	63	51	74	26	35		17	14	34	96	78	120	119	192	203	142	123	104	152	177	73	36	101
ΜΥΚΟΝΟΣ	94	157	152	160	73	61	71	28	25	17		10	52	82	56	97	87	180	182	120	102	111	142	178	54	51	85
ΤΗΝΟΣ	86	162	159	153	71	49	81	33	34	14	10		35	81	63	105	100	185	194	132	113	100	138	169	65	49	91
ΑΝΔΡΟΣ	80	182	184	151	84	30	119	59	67	34	52	35		87	103	129	152	223	243	164	146	70	135	145	101	65	130
ΧΙΟΣ	153	237	227	233	153	119	144	109	101	96	82	81	87		54	57	133	216	207	126	114	107	55	124	113	130	97
ΙΚΑΡΙΑ	143	194	179	211	130	133	99	60	63	78	56	63	103	54		22	77	161	162	78	63	133	135	177	62	103	50
ΣΑΜΟΣ	190	226	206	251	164	153	131	115	104	120	97	105	129	57	22		95	163	158	66	58	159	146	185	93	144	40
ΑΣΤΥΠΑΛΛΙΑ	193	139	115	194	113	152	57	79	66	119	87	100	152	133	77	95		90	109	60	44	195	223	260	54	103	30
ΚΑΡΠΑΘΟΣ	287	177	141	251	185	229	128	164	157	192	180	185	223	216	161	163	90		94	100	106	286	310	350	124	183	115
ΡΟΔΟΣ	298	233	199	302	221	254	166	183	171	203	182	194	243	207	162	158	109	94		64	89	288	317	360	139	212	105
ΚΩΣ	238	200	171	251	166	178	116	124	111	142	120	132	164	126	78	66	60	100	64		16	217	225	284	82	152	35
ΚΑΛΥΜΝΟΣ	219	186	161	234	148	160	100	106	93	123	102	113	146	114	63	58	44	106	89	16		201	211	271	65	133	20
ΣΚΥΡΟΣ	144	251	258	216	152	94	178	131	135	104	111	100	70	107	133	159	195	286	288	217	201		115	80	164	134	185
ΜΥΤΙΛΗΝΗ	215	300	289	294	216	165	225	172	164	152	142	138	135	55	135	146	223	310	317	225	211	115		102	197	199	195
ΛΗΜΝΟΣ	221	330	328	306	235	166	247	202	201	177	178	169	145	124	177	185	260	350	360	284	271	80	102		230	213	253
ΑΜΟΡΓΟΣ	148	133	117	169	84	105	39	51	40	73	54	65	101	113	62	93	54	124	139	82	65	164	197	230		71	70
ΣΙΦΝΟΣ	90	118	122	107	17	58	55	30	42	36	51	49	65	130	103	144	103	183	212	152	133	134	199	213	71		120
ΛΕΡΟΣ	200	195	154	210	132	150	90	96	85	101	85	91	130	97	50	40	30	115	105	35	20	185	195	253	70		120

Οι αποστάσεις αυτές προέρχονται από στοιχεία του Υπουργείου Ναυτιλίας και Αιγαίου, από ναυτικούς χάρτες καθώς και από ιστοσελίδες υπολογισμού αποστάσεων μεταξύ λιμένων (port to port distances).

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6.3) παρουσιάζονται τα στοιχεία προσφοράς και ζήτησης για κάθε λιμένα του δικτύου, όπως καταγράφηκαν από το Υπουργείο Εμπορικής Ναυτιλίας. Τα δεδομένα ζήτησης και προσφοράς είναι εκφρασμένα σε μικρά εμπορευματοκιβώτια (small containers), που αποτελεί και βασική παραδοχή του προβλήματος ως προς το μέσο μοναδοποίησης. Όλα τα εμπορεύματα που διακινούνται στο δίκτυο, μεταφέρονται σε μικρά εμπορευματοκιβώτια διαστάσεων 2/2,38/1,10 m (μήκος/πλάτος/ύψος), με δυνατότητα μέγιστου φορτίου που προσεγγίζει τους 5 τόνους (Sambracos et al., 2004). Θεωρείται δεδομένο πως τα προϊόντα που διακινούνται μπορούν να τυποποιηθούν και να στοιβαχθούν μέσα στα μικρά εμπορευματοκιβώτια. Άλλωστε, τα εμπορεύματα με προορισμό τα νησιά αφορούν κυρίως καύσιμα, πρώτες ύλες και βιομηχανοποιημένα προϊόντα, ενώ εκείνα με προέλευση τα νησιά συνήθως είναι προϊόντα του πρωτογενούς τομέα παραγωγής (τυποποιημένα ή μη) καθώς και πρώτες ύλες. Η στοιβασιά τους στα εμπορευματοκιβώτια εγγυάται την καλή κατάσταση μεταφοράς τους αλλά και την συμφερότερη διάταξη στα διαμερίσματα του πλοίου. Ένα ζήτημα που εκπορεύεται από τη χρήση των μικρών ε/κ σχετίζεται με το χρόνο εξυπηρέτησης εντός του λιμένα, δηλαδή το χρόνο μέχρι το πλοίο να προσεγγίσει το κρηπίδωμα του λιμανιού, το χρόνο φορτοεκφόρτωσης των ε/κ και το χρόνο αποχώρησης του πλοίου από το λιμένα. Λαμβάνοντας υπόψη τα προβλήματα λιμενικών υποδομών που αντιμετωπίζουν τα περισσότερα νησιά του δικτύου καθώς και τη συχνή έλλειψη τεχνικού εξοπλισμού (π.χ. γερανογέφυρες) για τη διευκόλυνση των φορτοεκφορτώσεων, διαμόρφωνεται μία εμπειρική σχέση για την εκτίμηση του χρόνου εξυπηρέτησης επί του λιμένα (Karlaftis et al., 2009), η οποία είναι συνάρτηση αφενός των λιμενικών χαρακτηριστικών αφετέρου των ποσοτήτων προσφοράς και ζήτησης:

$$ST_i = 1 + \frac{2,4}{60} * (D_i + S_i) \quad (6.1)$$

Όπου ST_i ο χρόνος εξυπηρέτησης σε κάθε κόμβο, D_i η ζήτηση σε κάθε κόμβο, S_i η προσφορά σε κάθε κόμβο. Λαμβάνεται εκ των προτέρων μία (1) ώρα ως χρόνος εισαγωγής-εξαγωγής από το λιμένα καθώς και χρόνος προετοιμασίας του πλοίου πριν τη φορτοεκφόρτωση και καθορίζεται ως απαιτούμενος χρόνος χειρισμών για κάθε εμπορευματοκιβώτιο 2,4 min.

Πίνακας 6.3 Ζήτηση, Προσφορά και χρόνος εξυπηρέτησης για κάθε λιμένα του δικτύου

Προορισμός	Ζήτηση (small containers)	Προσφορά (small containers)	Χρόνος εξυπηρέτησης (h)
Ρέθυμνο	12	7	1.8
Ηράκλειο	70	57	6.1
Κύθηρα	5	1	1.3
Μήλος	10	43	3.1
Κέα	7	0	1.3
Θήρα	33	2	2.4
Πάρος	15	19	2.4
Νάξος	16	2	1.7
Σύρος	12	8	1.8
Μύκονος	37	1	2.5
Τήνος	9	1	1.4
Άνδρος	3	1	1.2
Χίος	22	9	2.2
Ικαρία	5	1	1.2
Σάμος	21	35	3.2
Αστυπάλαια	9	1	1.4
Κάρπαθος	8	1	1.4
Ρόδος	58	15	3.9
Κως	23	3	2.0
Κάλυμνος	11	0	1.4
Σκύρος	2	0	1.1
Μυτιλήνη	46	21	3.7
Λήμνος	21	6	2.1
Αμοργός	5	1	1.2
Σίφνος	4	0	1.2
Λέρος	9	1	1,4

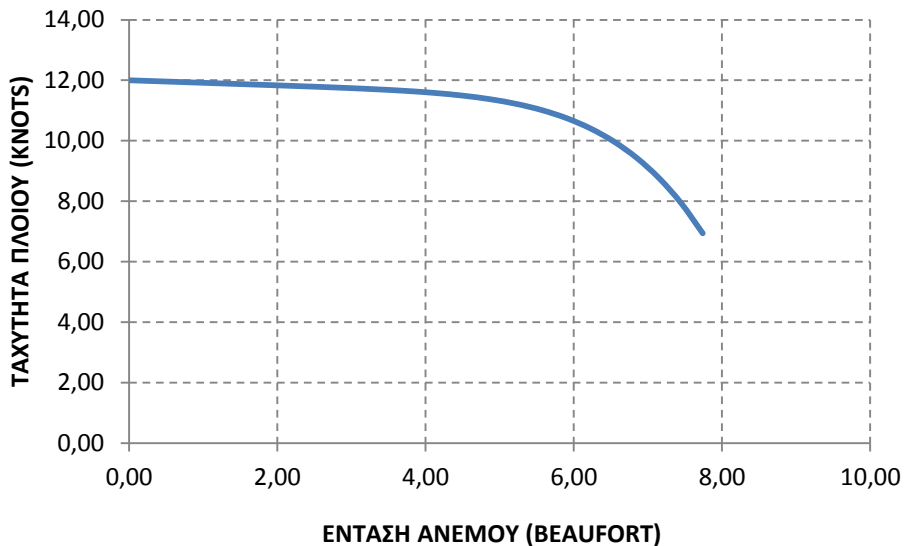
Υπενθυμίζεται ότι το κεντρικό λιμάνι του δικτύου στην ενδοχώρα (Πειραιάς), παρουσιάζει προσφορά η οποία είναι ισοδύναμη με το σύνολο της ζητούμενης ποσότητας όλων των νησιών. Όπως είναι ευδιάκριτο από τα παραπάνω δεδομένα, για τα περισσότερα λιμάνια η ζήτηση υπερβαίνει την προσφορά, εκτός από ορισμένα νησιά που είτε διαθέτουν σημαντικό πρωτογενή και δευτερογενή τομέα (Κρήτη) είτε αποτελούν σημαντικές πλουτοπαραγωγικές πηγές (Μήλος, Πάρος). Τα στοιχεία αυτά αναφέρονται σε μία τακτική χρονική βάση, η οποία στο πλαίσιο της παρούσας εφαρμογής λαμβάνεται ως εβδομαδιαία. Άρα και το σύνολο των διαδρομών, όπως θα προκύψουν από την επίλυση του αλγορίθμου, θα εκτελείται σε εβδομαδιαία βάση.

6.3 Πλοίο αναφοράς για το υπό εξέταση δίκτυο

Σύμφωνα με τον Sambracos (2000), ο εμπορικός στόλος που δραστηριοποιείται στο Αιγαίο πέλαγος, αποτελείται από διάφορους τύπους πλοίων: πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου, δεξαμενόπλοια (tankers), πλοία γενικού φορτίου, πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Στην παρούσα εργασία, δεδομένης της χρήσης των μικρών εμπορευματοκιβωτίων, θεωρείται ότι ο στόλος είναι ομοιογενής και αποτελείται από πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (containerships). Δεδομένης της λειτουργίας των συγκεκριμένων πλοίων στο Αιγαίο ως τροφοδοτικών (feeder ships) που εφοδιάζουν τη νησιωτική αγορά, το μέγεθος τους είναι μικρό σε σχέση με τα μεγάλα πλοία της κατηγορίας που εξυπηρετούν τις κύριες διηπειρωτικές ναυτιλιακές γραμμές. Για το πλοίο αναφοράς, γίνεται η παραδοχή χωρητικότητας της τάξης των 150 μικρών εμπορευματοκιβωτίων. Όσον αφορά στην ταχύτητα λειτουργίας του πλοίου, οριοθετείται ως αρχική η ταχύτητα των 12 κόμβων/ώρα. Με την έννοια αρχική εννοείται η ταχύτητα που έχει το πλοίο σε συνθήκες μηδενικής έντασης ανέμου (0 Beaufort). Βέβαια, όπως έχει ήδη αναλυθεί, όσο αυξάνει η ένταση του ανέμου, τόσο μεγαλύτερης κλίμακας είναι και η απομείωση της ταχύτητας. Επίσης, για την καλύτερη δυνατή φορτοεκφόρτωση των εμπορευματοκιβωτίων, ειδικά σε λιμένες με ανεπαρκείς υποδομές, θεωρείται ότι το πλοίο είναι τύπου Ro-Ro (roll on/roll off). Τέλος, σε σχέση με τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά, θεωρείται ότι το μήκος του κρηπιδώματος των λιμένων του δικτύου επαρκεί για την ασφαλή παραβολή του πλοίου.



Σχήμα 6.1 Τροφοδοτικό πλοίο ανάλογου μεγέθους με το πλοίο αναφοράς (Πηγή: MarineTraffic.com)



Σχήμα 6.2 Καμπύλη απόδοσης πλοίου αναφοράς

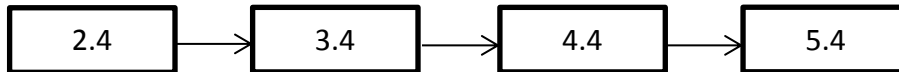
Στο σχήμα 6.2 παρουσιάζεται η καμπύλη απόδοσης του πλοίου αναφοράς, όπου παρουσιάζεται η απομείωση της ταχύτητας λειτουργίας του πλοίου σε σχέση με την ένταση του πνέοντος ανέμου. Για την εφαρμογή της μεθόδου των Townsin & Kwon (Kwon, 1981), το πλήρες εκτόπισμα του πλοίου λαμβάνει τη συμβατική τιμή των 20.100 m^3 , όπως αυτή διατυπώθηκε από τους ερευνητές στην περίπτωση των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μικρού μεγέθους. Το πλήρες εκτόπισμα του πλοίου (full displacement) ισοδυναμεί με τον όγκο του εκτοπιζόμενου ύδατος (volume of displacement), που υπεισέρχεται στον τύπο υπολογισμού της απομείωσης ταχύτητας. Η χρήση της μεθόδου των Townsin & Kwon δεν επεκτείνεται πέρα από το όριο ταχύτητας ανέμου των 18 m/sec , όριο σημαντικότητας της ακούσιας απώλειας ταχύτητας στην εν λόγω δρομολόγηση.

6.4 Υπολογισμός χρόνων διαδρομής

Η στοχαστικότητα των χρόνων διαδρομής δεν επιτρέπει την απευθείας εξαγωγή των χρόνων διαδρομής, αλλά όπως έχει περιγραφεί, απαιτείται η εκτίμηση της κατανομής των χρόνων, για κάθε ζεύγος προέλευσης-προορισμού. Για αυτό το λόγο, ακολουθείται η μεθοδολογία του Κεφαλαίου 5 για κάθε πιθανό ζεύγος του δικτύου. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής αυτής της μεθοδολογίας για το ζεύγος κόμβων Πειραιάς-Λέρος:

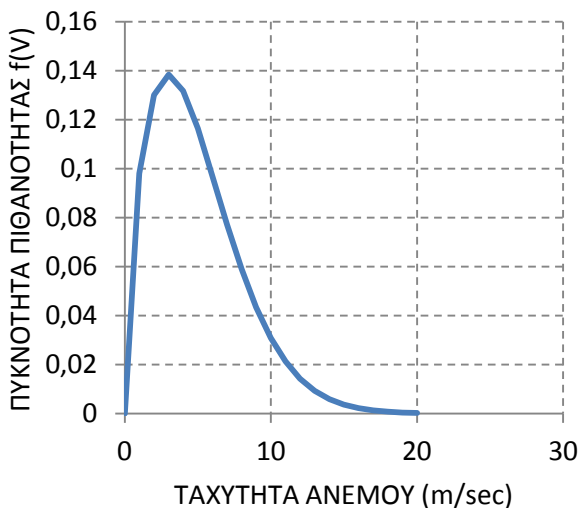
1) Γεωγραφική αποτύπωση της διαδρομής:

Αφού ερευνηθεί επί χάρτου η αντίστοιχη διαδρομή που ακολουθούν επιβατηγά και εμπορικά πλοία, προκύπτουν τα τμήματα του κανάβου από τα οποία διέρχεται το πλοίο:

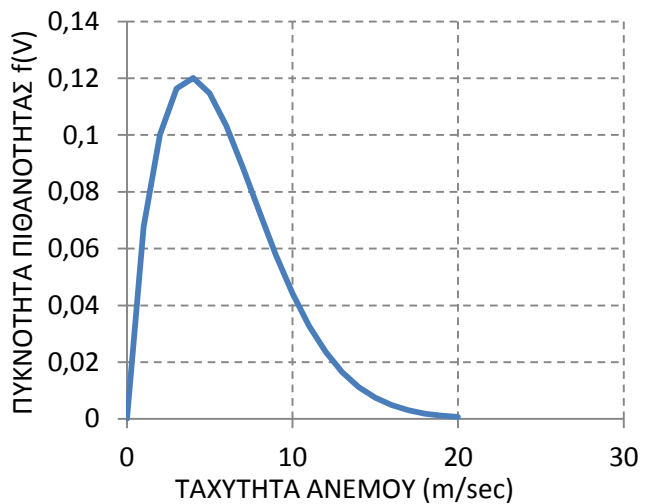


Όσον αφορά στο συντελεστή συμβολής του κάθε τμήματος, θεωρείται απλοποιητικά ότι το πλοίο διέρχεται εξίσου από κάθε ζώνη του κανάβου.

2) Υπολογισμός κατανομής πυκνότητας-πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου για κάθε επιμέρους τμήμα της διαδρομής:

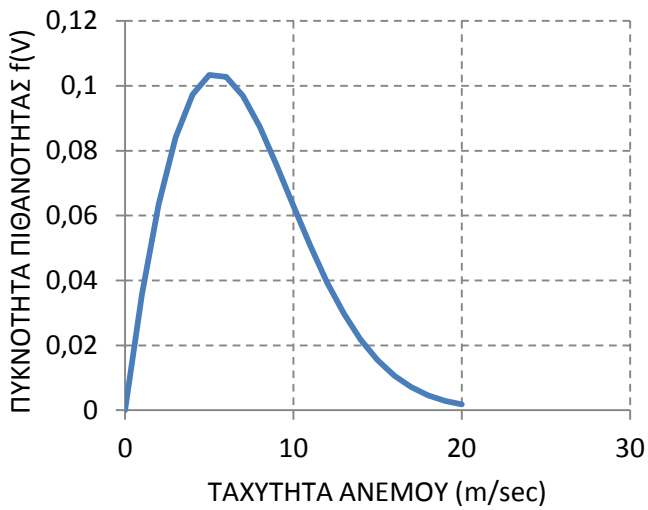


Σχήμα 6.3 Κατανομή ταχύτητας ανέμου για το τμήμα 2.4

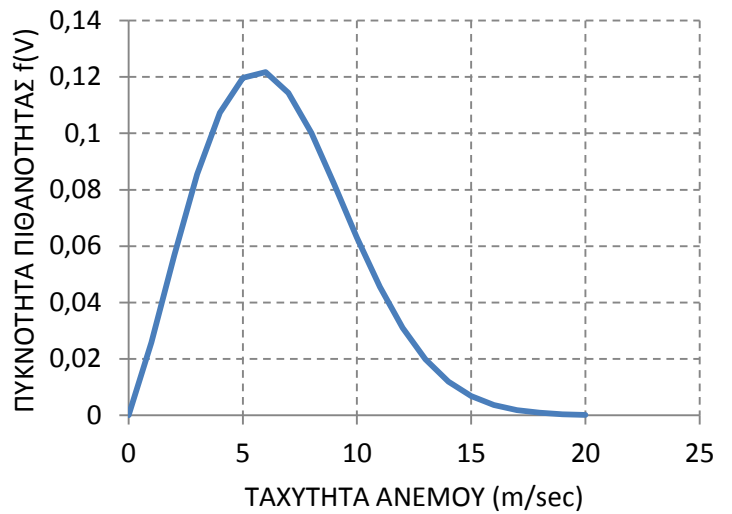


Σχήμα 6.4 Κατανομή ταχύτητας ανέμου για το τμήμα 3.4

Τα δύο παραπάνω διαγράμματα παριστάνουν την κατανομή πυκνότητας πιθανότητας στα τμήματα 2.4 και 3.4, ενώ τα δύο επόμενα στα τμήματα 4.4 και 5.4 αντίστοιχα.



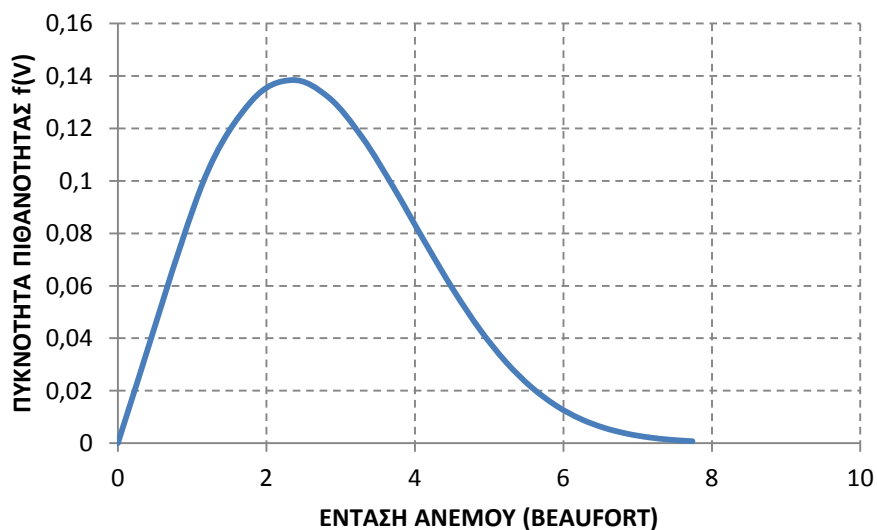
Σχήμα 6.5 Κατανομή ταχύτητας ανέμου για το τμήμα 4.4



Σχήμα 6.6 Κατανομή ταχύτητας ανέμου για το τμήμα 5.4

3) Εκτίμηση συνολικής κατανομής της ταχύτητας του ανέμου για το ζεύγος προέλευσης-προορισμού

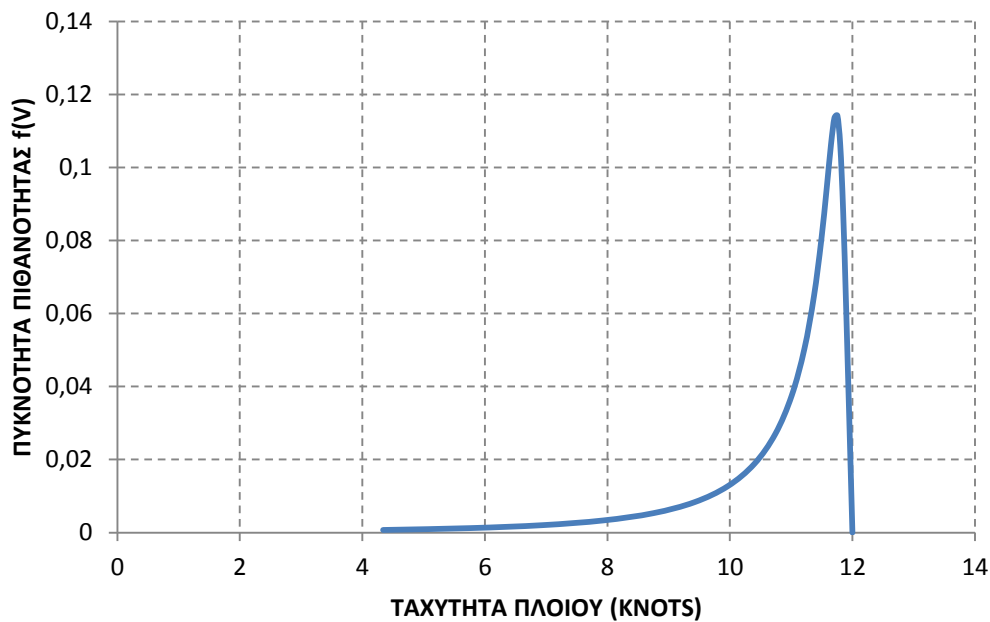
Βάσει των κατανομών του κάθε τμήματος ξεχωριστά και δεδομένης της ισότιμης συμβολής του κάθε τμήματος στη συνολική διαδρομή προκύπτει η συνολική πιθανοτική κατανομή της ταχύτητας ανέμου:



Σχήμα 6.7 Συνολική κατανομή ταχύτητας ανέμου για το ζεύγος ΠΠ

4) Προσδιορισμός της απώλειας ταχύτητας και εκτίμηση της συνολικής κατανομής ταχύτητας πλοίου

Για το τμήμα Πειραιάς-Λέρος, συσχετίζεται η απώλεια ταχύτητας του πλοίου με την πιθανότητα εμφάνισης των διαφόρων τιμών έντασης του ανέμου. Θεωρώντας ως αρχική ταχύτητα πλοίου τους 12 κόμβους/ώρα, προκύπτει για κάθε τιμή έντασης ανέμου η ταχύτητα του πλοίου καθώς και η πιθανότητα να εμφανίζει το πλοίο αυτή την ταχύτητα.



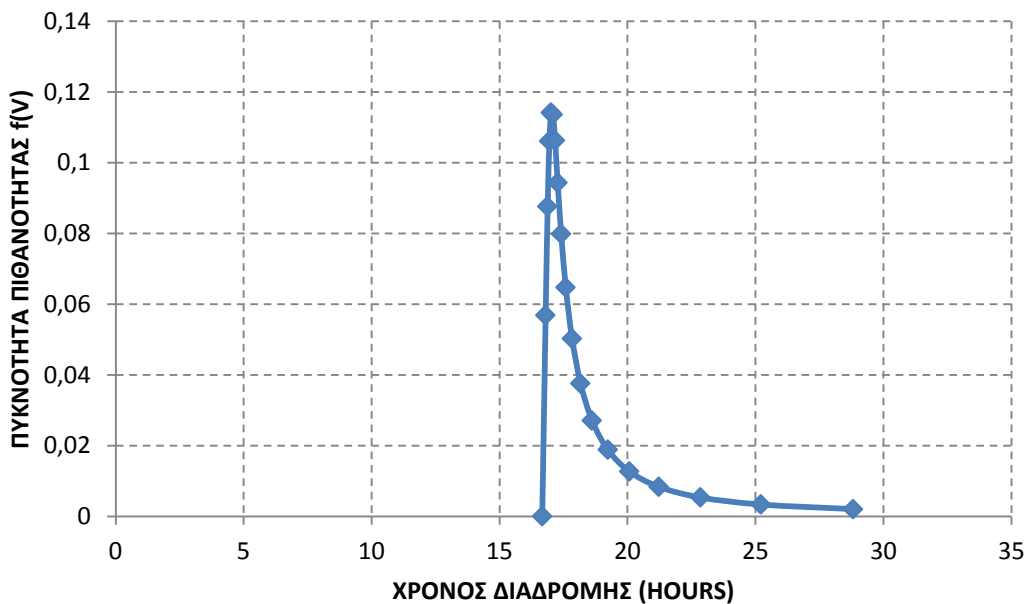
Σχήμα 6.8 Πιθανοτική κατανομή ταχύτητας πλοίου

5) Εξαγωγή τελικής κατανομής χρόνου διαδρομής για το ζεύγος προέλευσης προορισμού

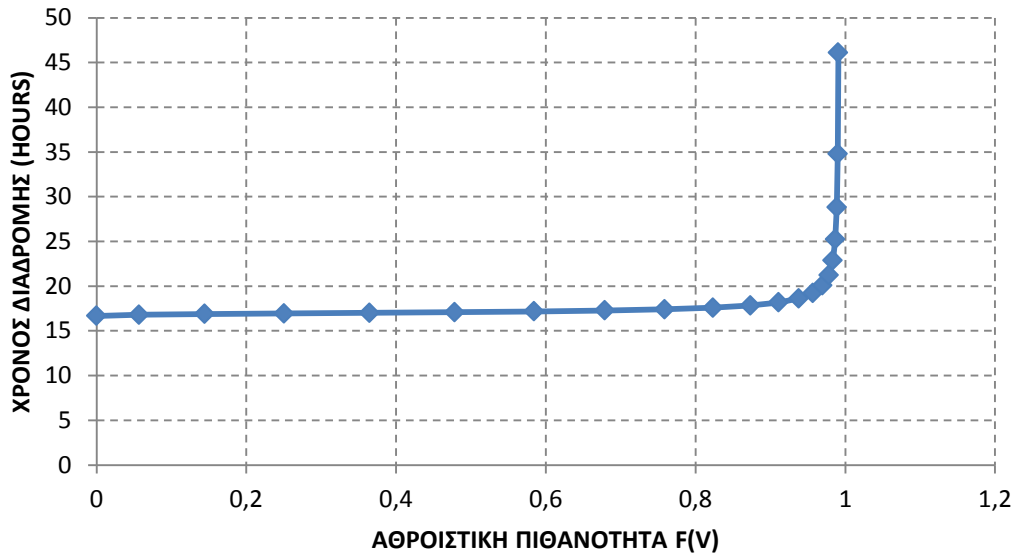
Βάσει και της απόστασης Πειραιάς-Λέρος που ορίζεται στα 200 ναυτικά μιλιά προκύπτει τελικά και η πιθανοτική κατανομή του χρόνου διαδρομής. Ο τελικός πίνακας με όλα τα δεδομένα και τα αποτελέσματα των παραπάνω βημάτων καθώς και η σχηματική πιθανοτική κατανομή του χρόνου ταξιδιού (δηλαδή η πιθανότητα εμφάνισης διαφόρων τιμών του χρόνου διαδρομής, τιμών που προέρχονται από τη στοχαστική ανάλυση) παρατίθενται παρακάτω:

Πίνακας 6.4 Τελικός πίνακας που συνοψίζει τα βήματα της διαδικασίας

V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Initial speed (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	16,67
1,00	1,13	0,06	0,06	12,00	0,79	11,91	16,80
2,00	1,79	0,09	0,14	12,00	1,25	11,85	16,88
3,00	2,34	0,11	0,25	12,00	1,66	11,80	16,95
4,00	2,84	0,11	0,36	12,00	2,04	11,75	17,01
5,00	3,29	0,11	0,48	12,00	2,45	11,71	17,09
6,00	3,72	0,11	0,58	12,00	2,92	11,65	17,17
7,00	4,12	0,09	0,68	12,00	3,50	11,58	17,27
8,00	4,51	0,08	0,76	12,00	4,25	11,49	17,41
9,00	4,88	0,06	0,82	12,00	5,24	11,37	17,59
10,00	5,23	0,05	0,87	12,00	6,54	11,22	17,83
11,00	5,57	0,04	0,91	12,00	8,25	11,01	18,17
12,00	5,91	0,03	0,94	12,00	10,48	10,74	18,62
13,00	6,23	0,02	0,96	12,00	13,33	10,40	19,23
14,00	6,55	0,01	0,97	12,00	16,95	9,97	20,07
15,00	6,85	0,01	0,98	12,00	21,48	9,42	21,23
16,00	7,15	0,01	0,98	12,00	27,08	8,75	22,85
17,00	7,45	0,00	0,99	12,00	33,91	7,93	25,22
18,00	7,74	0,00	0,99	12,00	42,18	6,94	28,82



Σχήμα 6.9 Πιθανοτική κατανομή του χρόνου ταξιδιού



Σχήμα 6.10 Αθροιστική πιθανότητα χρόνου διαδρομής

Παρατηρείται ότι η αθροιστική συχνότητα δε φτάνει μέχρι το 1 όπως είναι αναμενόμενο, αλλά μέχρι το 0,99. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ανάλυση του ανεμολογικού προφίλ έχει γίνει μέχρι την ταχύτητα ανέμου 18m/sec που ισοδυναμεί περίπου με 7,75 Beaufort σε κλίμακα έντασης. Άλλωστε, μέχρι εκείνο το εύρος τιμών (7-8 Beaufort) μπορεί να προσεγγιστεί το ποσοστό ακούσιας απώλειας ταχύτητας από τον τύπο των Townsin & Kwon. Για μεγαλύτερη ένταση ανέμου, η ακούσια απώλεια είναι αμελητέα σε σχέση με την εκούσια, η οποία καθορίζεται από τον καπετάνιο του πλοίου ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες.

Όπως διαμορφώθηκε η κατανομή του χρόνου διαδρομής για το ζεύγος Πειραιάς-Λέρος, κατά ανάλογο τρόπο υπολογίζεται και η κατανομή των χρόνων διαδρομής για κάθε πιθανό ζεύγος του πίνακα προέλευσης προορισμού. Λόγω του όγκου των δεδομένων, κάποια συγκεντρωτικά στοιχεία αυτής της τυποποίησης παρουσιάζονται στο παράρτημα της εργασίας.

Εφόσον είναι διαθέσιμες οι χρονικές κατανομές, είναι δυνατός ο μετασχηματισμός του μεταβαλλόμενου περιορισμού (3.7) από στοχαστικό σε ντετερμινιστικό, μέσω του καθορισμού του επιπέδου εμπιστοσύνης α . Υπενθυμίζεται ότι σύμφωνα με αυτόν τον περιορισμό, ο συνολικός χρόνος διαδρομής είναι μικρότερος από ένα άνω όριο τιμής για μια πιθανότητα α . Ο περιορισμός υλοποιείται θεωρώντας ως αντιπροσωπευτικό χρόνο κάθε διαδρομής, εκείνον που αντιστοιχεί στο επίπεδο εμπιστοσύνης που ορίζεται. Δηλαδή,

εφόσον ο συνολικός χρόνος διαδρομής πρέπει να είναι μικρότερος από ένα άνω όριο για μία προκαθορισμένη πιθανότητα, τότε κατά την επίλυση λαμβάνονται υπόψη οι χρόνοι διαδρομής που αντιστοιχούν, βάσει της κατανομής, σε αυτή την πιθανότητα και είναι μικρότεροι από το άνω χρονικό όριο. Επειδή το κάθε δρομολόγιο που προκύπτει από την επίλυση είναι στην ουσία άθροισμα των επιμέρους ακμών που συνδέουν τα ζεύγη προέλευσης-προορισμού, τότε η αντιπροσωπευτική αυτή θεώρηση επεκτείνεται και στο χρόνο διαδρομής του κάθε ζεύγους. Για την παρούσα εφαρμογή τίθεται η παράμετρος $\alpha=0,90$. Με αυτόν τον τρόπο, ο μεταβαλλόμενος περιορισμός μετατρέπεται σε σταθερό και η επίλυση του στοχαστικού προβλήματος μπορεί να επιτευχθεί με όρους ντετερμινιστικού.

Για το ίδιο παράδειγμα που περιγράφηκε, τη διαδρομή Πειραιάς-Λέρος, όπως προκύπτει από τη στήλη της αθροιστικής πιθανότητας $F(V)$ (Στήλη 4) και τη στήλη του χρόνου διαδρομής t_{ij} (Στήλη 8) του Πίνακα 6.4 με γραμμική παρεμβολή, ο χρόνος που αντιστοιχεί σε επίπεδο εμπιστοσύνης 90% είναι 18 ώρες. Η εύρεση του συγκεκριμένου χρόνου επαναλαμβάνεται για όλα τα ζεύγη κόμβων του δικτύου.

Όπως σημειώθηκε, ο συνολικός χρόνος διαδρομής για επίπεδο εμπιστοσύνης α είναι μικρότερος από ένα άνω όριο τιμής. Το εν λόγω όριο τιμής καθορίζεται από τις ελληνικές λιμενικές αρχές και συνίσταται σε μία χρονική προθεσμία μετά την αναχώρηση του πλοίου από τον κεντρικό λιμένα (Sambrosos, 2000). Η χρονική προθεσμία αυτή κυμαίνεται μεταξύ 35 και 40 ωρών από τη στιγμή της αναχώρησης του πλοίου από τον κεντρικό λιμένα μέχρι τον εφοδιασμό του τελευταίου νησιού της κάθε διαδρομής με εμπορεύματα. Στην παρούσα εφαρμογή, λαμβάνεται το μέγιστο δυνατό χρονικό όριο της τάξης των 40 ωρών από την έναρξη του ταξιδιού. Κατά την περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου του προβλήματος, η μη υπέρβαση του χρονικού ορίου της κάθε διαδρομής ορίστηκε ως ασθενής περιορισμός. Ως εκ τούτου, μία η περισσότερες διαδρομές ενδέχεται να ξεπεράσουν το μέγιστο επιτρεπόμενο χρόνο, επισύροντας φυσικά το ανάλογο ποσοστό ποινής.

Στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 6.5), παρουσιάζεται για κάθε ζεύγος ΠΠ του δικτύου, ο χρόνος διαδρομής που αντιστοιχεί στο 90% της αθροιστικής πιθανότητας $F(V)$:

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΑΙΓΑΙΟ ΠΕΛΑΓΟΣ
Πίνακας 6.5 Χρόνοι διαδρομής μεταξύ των κόμβων του δικτύου

	ΠΕΙΡΑΙΑΣ	ΡΕΘΥΜΝΟ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ	ΚΥΘΗΡΑ	ΜΗΛΟΣ	ΚΕΑ	ΘΗΡΑ	ΠΑΡΟΣ	ΝΑΞΟΣ	ΣΥΡΟΣ	ΜΥΚΟΝΟΣ	ΤΗΝΟΣ	ΑΝΔΡΟΣ	ΧΙΟΣ	ΙΚΑΡΙΑ	ΣΑΜΟΣ	ΑΣΤΥΠΑΛΛΙΑ	ΚΑΡΠΑΘΟΣ	ΡΟΔΟΣ	ΚΩΣ	ΚΑΛΥΜΝΟΣ	ΣΚΥΡΟΣ	ΜΥΤΙΛΗΝΗ	ΛΗΜΝΟΣ	ΑΜΟΡΓΟΣ	ΣΙΦΝΟΣ	ΛΕΡΟΣ
ΠΕΙΡΑΙΑΣ	0,00	13,99	15,41	11,29	8,65	4,43	13,14	8,64	9,27	7,40	8,54	7,67	7,13	13,77	12,99	17,10	17,37	25,83	26,82	21,42	19,71	12,75	19,35	19,71	13,32	8,04	18,00
ΡΕΘΥΜΝΟ	13,99	0,00	3,31	9,56	9,00	14,85	8,48	11,70	12,24	13,55	14,29	14,58	16,38	21,33	17,66	20,34	12,51	15,67	20,97	18,00	16,74	22,59	27,00	29,70	11,97	10,62	17,55
ΗΡΑΚΛΕΙΟ	15,41	3,31	0,00	12,57	9,81	15,66	6,16	11,34	11,61	13,68	13,84	14,31	16,56	20,43	16,29	18,54	10,35	12,49	17,91	15,39	14,49	23,22	26,01	29,52	10,53	10,98	13,86
ΚΥΘΗΡΑ	11,29	9,56	12,57	0,00	8,01	10,90	12,56	12,29	14,02	12,42	14,40	13,77	13,59	20,97	19,21	22,59	17,66	22,85	27,18	22,85	21,30	19,44	26,46	27,54	15,38	9,63	19,12
ΜΗΛΟΣ	8,65	9,00	9,81	8,01	0,00	6,03	7,20	4,41	5,49	5,67	6,57	6,39	7,56	13,77	11,95	14,90	10,17	16,65	19,89	14,94	13,32	13,68	19,44	21,15	7,56	1,53	11,88
ΚΕΑ	4,43	14,85	15,66	10,90	6,03	0,00	9,54	6,39	7,47	4,59	5,49	4,41	2,70	10,71	12,23	13,90	13,68	20,61	22,86	16,02	14,40	8,46	14,85	14,94	9,45	5,22	13,62
ΘΗΡΑ	13,14	8,48	6,16	12,56	7,20	9,54	0,00	5,46	4,60	6,66	6,53	7,29	10,71	13,24	9,10	12,05	5,24	11,52	14,94	10,44	9,00	16,37	20,69	22,43	3,59	4,95	8,10
ΠΑΡΟΣ	8,64	11,70	11,34	12,29	4,41	6,39	5,46	0,00	1,71	2,34	2,52	2,97	5,31	10,02	5,52	10,45	7,11	14,76	16,47	11,16	9,54	11,79	15,82	18,18	4,59	2,70	8,64
ΝΑΞΟΣ	9,27	12,24	11,61	14,02	5,49	7,47	4,60	1,71	0,00	3,15	2,30	3,06	6,03	9,29	5,79	9,56	6,07	14,13	15,39	10,08	8,45	12,41	15,08	18,09	3,68	3,78	7,72
ΣΥΡΟΣ	7,40	13,55	13,68	12,42	5,67	4,59	6,66	2,34	3,15	0,00	1,53	1,26	3,06	8,64	7,17	10,90	10,71	17,28	18,44	12,90	11,17	9,36	13,68	15,93	6,57	3,24	9,17
ΜΥΚΟΝΟΣ	8,54	14,29	13,84	14,40	6,57	5,49	6,53	2,52	2,30	1,53	0,00	0,92	4,78	7,54	5,21	8,92	8,00	16,55	16,53	10,90	9,26	9,28	13,06	16,02	4,97	4,69	7,82
ΤΗΝΟΣ	7,67	14,58	14,31	13,77	6,39	4,41	7,29	2,97	3,06	1,26	0,92	0,00	3,15	7,29	5,79	9,54	9,00	16,65	17,62	11,99	10,26	9,00	12,42	15,21	5,85	4,41	8,27
ΑΝΔΡΟΣ	7,13	16,38	16,56	13,59	7,56	2,70	10,71	5,31	6,03	3,06	4,78	3,15	0,00	7,83	9,47	11,72	13,68	20,07	22,07	14,90	13,26	6,30	12,15	13,05	9,09	5,85	11,81
ΧΙΟΣ	13,77	21,33	20,43	20,97	13,77	10,71	13,24	10,02	9,29	8,64	7,54	7,29	7,83	0,00	4,97	5,18	12,23	19,86	18,80	11,44	10,35	9,84	4,95	11,40	10,39	11,95	8,81
ΙΚΑΡΙΑ	12,99	17,66	16,29	19,21	11,95	12,23	9,10	5,52	5,79	7,17	5,21	5,79	9,47	4,97	0,00	2,02	7,08	14,81	14,71	7,08	5,72	12,11	12,41	15,93	5,70	9,47	4,60
ΣΑΜΟΣ	17,10	20,34	18,54	22,59	14,90	13,90	12,05	10,45	9,56	10,90	8,92	9,54	11,72	5,18	2,02	0,00	8,55	14,67	14,22	5,94	5,22	14,31	13,14	16,65	8,55	13,24	3,60
ΑΣΤΥΠΑΛΛΙΑ	17,37	12,51	10,35	17,66	10,17	13,68	5,24	7,11	6,07	10,71	8,00	9,00	13,68	12,23	7,08	8,55	0,00	8,10	9,81	5,40	3,96	17,93	20,51	23,91	4,97	9,27	2,70
ΚΑΡΠΑΘΟΣ	25,83	15,67	12,49	22,85	16,65	20,61	11,52	14,76	14,13	17,28	16,55	16,65	20,07	19,86	14,81	14,67	8,10	0,00	8,46	9,00	9,54	25,74	27,90	31,50	11,16	16,47	10,35
ΡΟΔΟΣ	26,82	20,97	17,91	27,18	19,89	22,86	14,94	16,47	15,39	18,44	16,53	17,62	22,07	18,80	14,71	14,22	9,81	8,46	0,00	5,76	8,01	25,92	28,53	32,40	12,51	19,08	9,45
ΚΩΣ	21,42	18,00	15,39	22,85	14,94	16,02	10,44	11,16	10,08	12,90	10,90	11,99	14,90	11,44	7,08	5,94	5,40	9,00	5,76	0,00	1,44	19,71	20,25	25,80	7,45	13,68	3,15
ΚΑΛΥΜΝΟΣ	19,71	16,74	14,49	21,30	13,32	14,40	9,00	9,54	8,45	11,17	9,26	10,26	13,26	10,35	5,72	5,22	3,96	9,54	8,01	1,44	0,00	18,26	18,99	24,61	5,90	11,97	1,80
ΣΚΥΡΟΣ	12,75	22,59	23,22	19,44	13,68	8,46	16,37	11,79	12,41	9,36	9,28	9,00	6,30	9,84	12,11	14,31	17,93	25,74	25,92	19,71	18,26	0,00	10,35	7,20	15,08	12,06	17,01
ΜΥΤΙΛΗΝΗ	19,35	27,00	26,01	26,46	19,44	14,85	20,69	15,82	15,08	13,68	13,06	12,42	12,15	4,95	12,41	13,14	20,51	27,90	28,53	20,25	18,99	10,35	0,00	9,18	18,12	17,91	17,93
ΛΗΜΝΟΣ	19,71	29,70	29,52	27,54	21,15	14,94	22,43	18,18	18,09	15,93	16,02	15,21	13,05	11,40	15,93	16,65	23,91	31,50	32,40	25,80	24,61	7,20	9,18	0,00	21,15	19,17	22,98
ΑΜΟΡΓΟΣ	13,32	11,97	10,53	15,38	7,56	9,45	3,59	4,59	3,68	6,57	4,97	5,85	9,09	10,39	5,70	8,55	4,97	11,16	12,51	7,45	5,90	15,08	18,12	21,15	0,00	6,39	6,36
ΣΙΦΝΟΣ	8,04	10,62	10,98	9,63	1,53	5,22	4,95	2,70	3,78	3,24	4,69	4,41	5,85	11,95	9,47	13,24	9,27	16,47	19,08	13,68	11,97	12,06	17,91	19,17	6,39	0,00	10,80
ΛΕΡΟΣ	18,00	17,55	13,86	19,12	11,88	13,62	8,10	8,64	7,72	9,17	7,82	8,27	11,81	8,81	4,60	3,60	2,70	10,35	9,45	3,15	1,80	17,01	17,93	22,98	6,36	10,80	0,00

6.5 Καθορισμός παραμέτρων γενετικού αλγορίθμου

Για την επίλυση του γενετικού αλγορίθμου μέσω του λογισμικού Evolver, απαιτείται ο καθορισμός βασικών παραμέτρων, κατά τρόπο συμβατό με τη φύση και τα δεδομένα της εφαρμογής. Τέτοιες παράμετροι είναι ο πληθυσμός, ο βαθμός διασταύρωσης και ο βαθμός μετάλλαξης. Επίσης, καθορίζεται και το ποσοστό ποινής επί του μέτρου καταλληλότητας του αλγορίθμου για ενδεχόμενη υπέρβαση του χρονικού ορίου διαδρομής.

Ως προς τον πληθυσμό, επιλέγονται 2 μεγέθη πληθυσμού, λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος της λύσης (ατόμου). Επειδή η εφαρμογή αναφέρεται σε 26 νησιωτικούς λιμένες, η κάθε λύση δρομολόγησης αποτελείται από 26 γονίδια (γονίδιο=λιμένας), οπότε το μέγεθος του πρώτου πληθυσμού που εξετάζεται είναι 26. Επίσης εξετάζεται το πρόβλημα και για μεγαλύτερο μέγεθος πληθυσμού, ίσο με 50, δεδομένου ότι με αυξημένο πληθυσμό είναι πιθανότερο να βρεθεί συνολικά βέλτιστη λύση λόγω μεγαλύτερης ποικιλίας γονιδίων. Βέβαια, μεγαλύτερος πληθυσμός ισοδυναμεί και με μεγαλύτερο υπολογιστικό χρόνο της καλύτερης λύσης.

Ο βαθμός διασταύρωσης (crossover rate), κατά την εκτέλεση των δοκιμών με το λογισμικό, λαμβάνει διαδοχικά τις τιμές 0,2, 0,4, 0,5, 0,6 για κάθε τιμή πληθυσμού. Για καθεμία από τις παραπάνω τιμές του βαθμού διασταύρωσης, θεωρούνται διαδοχικά για το βαθμό μετάλλαξης (mutation rate), οι τιμές 0,05, 0,1, 0,15. Ο βαθμός μετάλλαξης δε λαμβάνει μεγάλες τιμές, προκειμένου να μην επηρεάζεται σημαντικά η κάθε παραγόμενη λύση του αλγορίθμου από την τυχαιότητα. Με αυτόν τον τρόπο σχηματίζονται 24 διαφορετικοί συνδυασμοί των παραμέτρων του γενετικού αλγορίθμου, για τους οποίους εκτελείται ο αλγόριθμος και υπολογίζεται το μέτρο καταλληλότητας (fitness value). Για κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου η γεννήτρια τυχαιών αριθμών επιλέγεται αυτόματα από το λογισμικό. Ο ΓΑ τερματίζεται όταν δεν παρατηρείται βελτίωση της συνάρτησης κατάλληλοτητας (ή η βελτίωση είναι μικρότερη από 1%) για έναν αριθμό γενεών, που στην παρούσα εφαρμογή ορίζεται στις 20.000. Φυσικά, η επίλυση του γενετικού αλγορίθμου και για τους 24 αυτούς συνδυασμούς αποσκοπεί στην κατά το δυνατό ελαχιστοποίηση του μέτρου καταλληλότητας που υλοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση και συνεπώς στην εύρεση της βέλτιστης δρομολόγησης.

Επίσης, κατά την υλοποίηση του αλγορίθμου ορίζεται και το ποσοστό της επιβαλλόμενης «ποινής» σε περίπτωση υπέρβασης του μέγιστου χρονικού ορίου διαδρομής. Η ποινή αυτή προσδιορίζεται ως ποσοστό προσαύξησης επί του μέτρου κατάλληλότητας της εκάστοτε λύσης (Karlaftis et al., 2009). Για οποιαδήποτε καθυστέρηση του πλοίου να αφιχθεί στο λιμένα προορισμού του, η προσαύξηση του συνολικού μέτρου καταλληλότητας εκτιμάται σε ποσοστό 50% επί του χρόνου υπέρβασης του προκαθορισμένου χρονικού ορίου διαδρομής. Άρα η μεταβλητή α στην εξίσωση 4.2 που υποδηλώνει το ποσοστό της ποινής ισούται με 0,5. Επιλέγεται ένα σχετικά υψηλό ποσοστό ποινής, προκειμένου να αποφευχθούν οι μεγάλης κλίμακας υπερβάσεις από το χρονικό όριο διαδρομής των πλοίων.

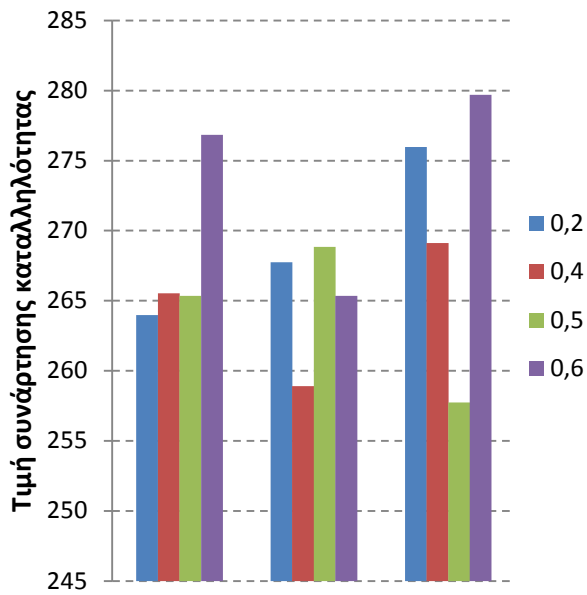
6.6 Αποτελέσματα του αλγορίθμου

6.6.1 Κύρια λύση δρομολόγησης

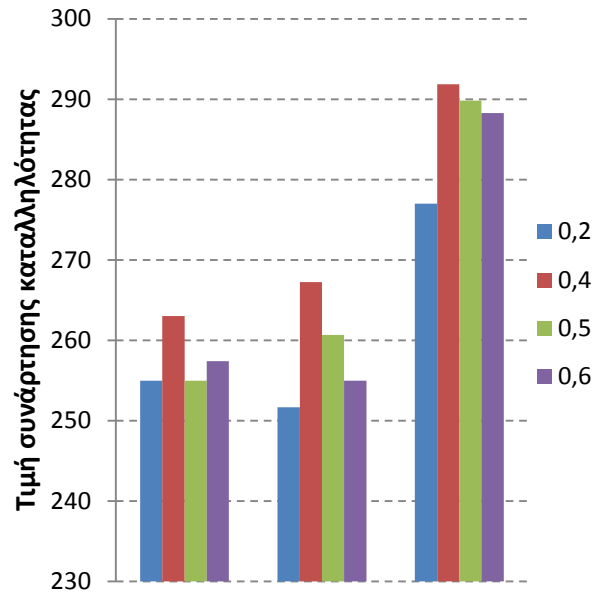
Στον πίνακα 6.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επίλυση του γενετικού αλγορίθμου για τους παραπάνω συνδυασμούς παραμέτρων. Τα αποτελέσματα αφορούν στην τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας, στον υπολογιστικό χρόνο για την εύρεση της βέλτιστης τιμής της καταλληλότητας και στον αριθμό των διαδρομών που προκύπτουν στο πλαίσιο της κάθε λύσης.

Πίνακας 6.6 Αποτελέσματα για διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων του ΓΑ

A/A	Πληθυσμός	Πιθανότητα διασταύρωσης	Πιθανότητα μετάλλαξης	Τιμή συνάρτησης καταλληλότητας	Υπολογιστικός χρόνος αλγορίθμου (min)	Αριθμός διαδρομών
1	26,00	0,20	0,05	263,98	9,20	4
2	26,00	0,20	0,10	267,75	7,00	4
3	26,00	0,20	0,15	275,98	15,20	4
4	26,00	0,40	0,05	265,54	16,10	4
5	26,00	0,40	0,10	258,90	19,80	4
6	26,00	0,40	0,15	269,13	18,60	4
7	26,00	0,50	0,05	265,35	7,40	4
8	26,00	0,50	0,10	268,85	6,00	4
9	26,00	0,50	0,15	257,73	18,90	4
10	26,00	0,60	0,05	276,83	9,40	4
11	26,00	0,60	0,10	265,35	7,20	4
12	26,00	0,60	0,15	279,71	17,30	4
13	50,00	0,20	0,05	254,99	18,30	4
14	50,00	0,20	0,10	251,62	20,7	4
15	50,00	0,20	0,15	277,00	18,70	4
16	50,00	0,40	0,05	263,02	19,50	4
17	50,00	0,40	0,10	267,24	18,50	4
18	50,00	0,40	0,15	291,87	19,20	4
19	50,00	0,50	0,05	254,97	13,40	4
20	50,00	0,50	0,10	260,68	13,70	4
21	50,00	0,50	0,15	289,83	12,40	4
22	50,00	0,60	0,05	257,39	12,10	4
23	50,00	0,60	0,10	254,97	11,20	4
24	50,00	0,60	0,15	288,29	9,30	4



Σχήμα 6.11 Τιμές συνάρτησης καταλληλότητας για διάφορους συνδυασμούς πιθανότητας μετάλλαξης και διασταύρωσης (πληθυσμός=26)



Σχήμα 6.12 Τιμές συνάρτησης καταλληλότητας για διάφορους συνδυασμούς πιθανότητας μετάλλαξης και διασταύρωσης (πληθυσμός=50)

Η μέση τιμή του μέτρου καταλληλότητας των παραπάνω δοκιμών είναι 268,25 ενώ η τυπική απόκλιση ισούται με 10,91. Υπολογίζοντας το λόγο της τυπικής απόκλισης των αποτελεσμάτων προς τη μέση τιμή, προκύπτει ο συντελεστής μεταβλητότητας με τιμή περίπου 0,04 (4%). Συνεπώς, το δείγμα των τιμών της συνάρτησης καταλληλότητας είναι ομοιογενές και τα αποτελέσματα των ποικίλων δοκιμών δεν παρουσιάζουν σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ τους. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των αποτελεσμάτων αποτελούν οι 4 διαδρομές για την εξυπηρέτηση του δικτύου, αριθμός που σχετίζεται άμεσα με τη χωρητικότητα του πλοίου αναφοράς. Επιπρόσθετα, από τα αποτελέσματα της καταλληλότητας των επιμέρους συνδυασμών προκύπτει πως για υψηλές τιμές του βαθμού μετάλλαξης παράγονται λύσεις χαμηλής ποιότητας ανεξάρτητα από την τιμή της πιθανότητας διασταύρωσης. Η τάση αυτή κρίνεται λογική, αν ληφθεί υπόψη η μεγαλύτερη επίδραση της τυχαιότητας όσο αυξάνεται η πιθανότητα μετάλλαξης.

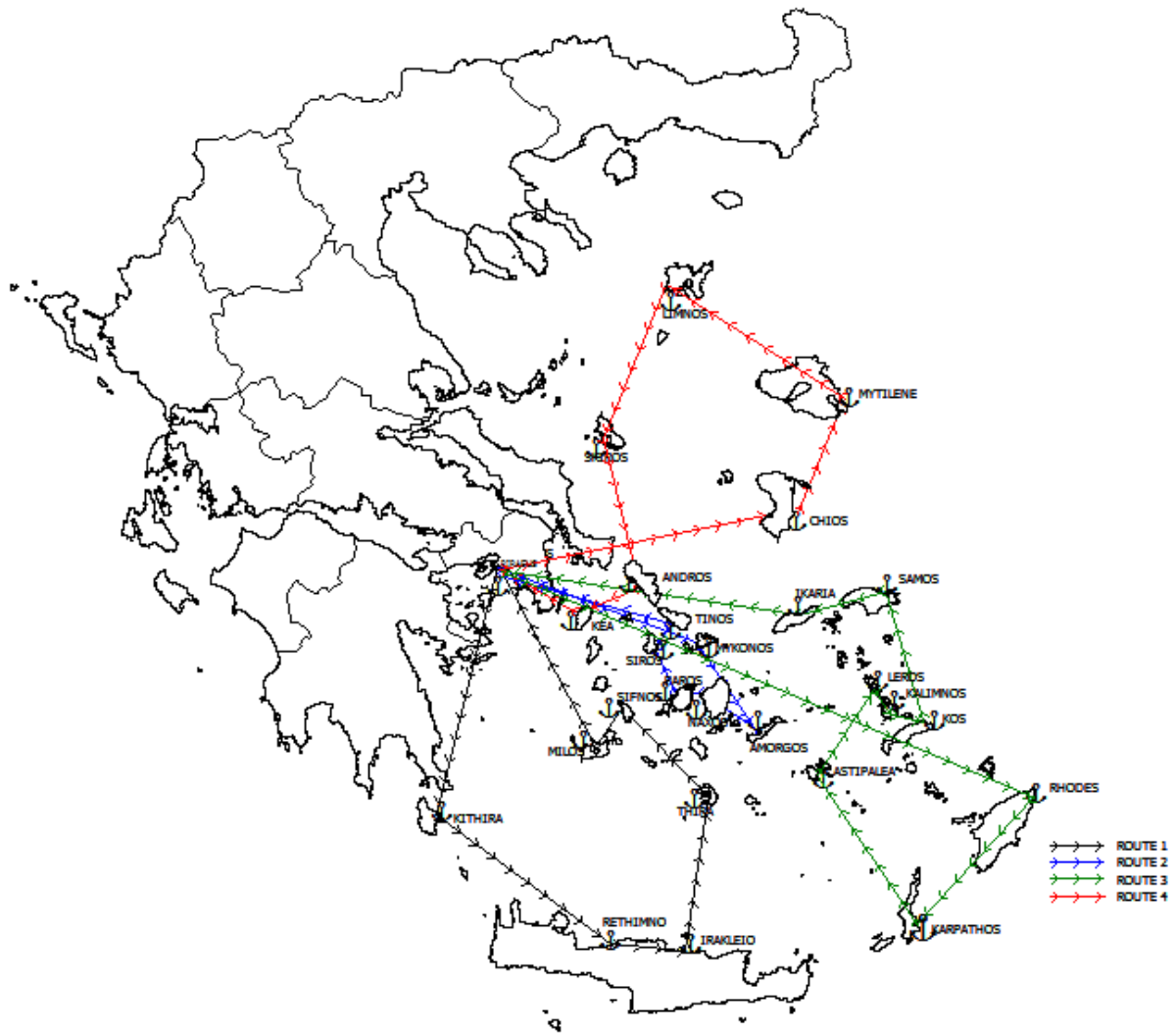
Όπως παρατηρείται από τον παραπάνω πίνακα, η δοκιμή του αλγορίθμου με α/α #14 (παράμετροι: μέγεθος πληθυσμού=50, πιθανότητα διασταύρωσης=0,2, πιθανότητα μετάλλαξης=0,1) αντιστοιχεί στη χαμηλότερη τιμή του μέτρου καταλληλότητας, κατ'επέκταση αντιστοιχεί και στο μικρότερο συνολικό χρόνο δρομολόγησης. Στο σχήμα 6.10 οπτικοποιείται το βέλτιστο σύνολο διαδρομών, όπως προέκυψε από την εκτέλεση του

ΓΑ. Πιο συγκεκριμένα, οι κόμβοι της κάθε διαδρομής και η σειρά που ακολουθείται κατά την πραγματοποίηση του κάθε δρομολογίου περιγράφονται ακολούθως:

Πίνακας 6.7 Περιγραφή διαδρομών βέλτιστης δρομολόγησης

Α/Α ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ	ΛΙΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑ ΣΕΙΡΑ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ
1	Πειραιάς-Κύθηρα-Ρέθυμνο-Ηράκλειο-Θήρα-Σίφνος-Μήλος-Πειραιάς
2	Πειραιάς-Μύκονος-Αμοργός-Νάξος-Πάρος-Σύρος-Τήνος-Πειραιάς
3	Πειραιάς-Ρόδος-Κάρπαθος-Αστυπάλαια-Λέρος-Κάλυμνος-Κως-Σάμος- Ικαρία-Πειραιάς
4	Πειραιάς-Χίος-Μυτιλήνη-Λήμνος-Σκύρος-Άνδρος-Κέα-Πειραιάς

Οι διαδρομές 1,2 και 4 εξυπηρετούν 6 νησιωτικούς λιμένες παραλαμβάνοντας και παραδίδοντας εμπορεύματα, ενώ κατά τη διαδρομή 8 το πλοίο διέρχεται από 8 νησιά. Σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η γεωγραφική διασπορά των διαδρομών. Κάθε διαδρομή εξυπηρετεί κατά κύριο λόγο ένα νησιωτικό σύμπλεγμα και δευτερευόντως διέρχεται και από ορισμένα νησιά παρακείμενης περιοχής του Αιγαίου. Για παράδειγμα, η διαδρομή 1 διέρχεται από την Κρήτη και τις νοτιοανατολικές Κυκλάδες, η διαδρομή 2 εξυπηρετεί τις Βόρειες και Κεντρικές Κυκλάδες, η διαδρομή 3 εξ'ολοκλήρου τα Δωδεκάνησα ενώ η τελευταία συνδέει τον Πειραιά με τα νησιά του Βορειοανατολικού Αιγαίου. Οι Κυκλάδες, επειδή αποτελούνται από πολλά και μικρά νησιά συμπεριλαμβάνονται σε 3 διαδρομές. Η γεωγραφική αυτή χωροθέτηση των διαδρομών οφείλεται στη δομή του αλγορίθμου, ο οποίος πρακτικά υλοποιεί διαδρομές κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται η συνολική πορεία που διανύει το πλοίο από τον κεντρικό λιμένα (Karlaftis et al., 2009).

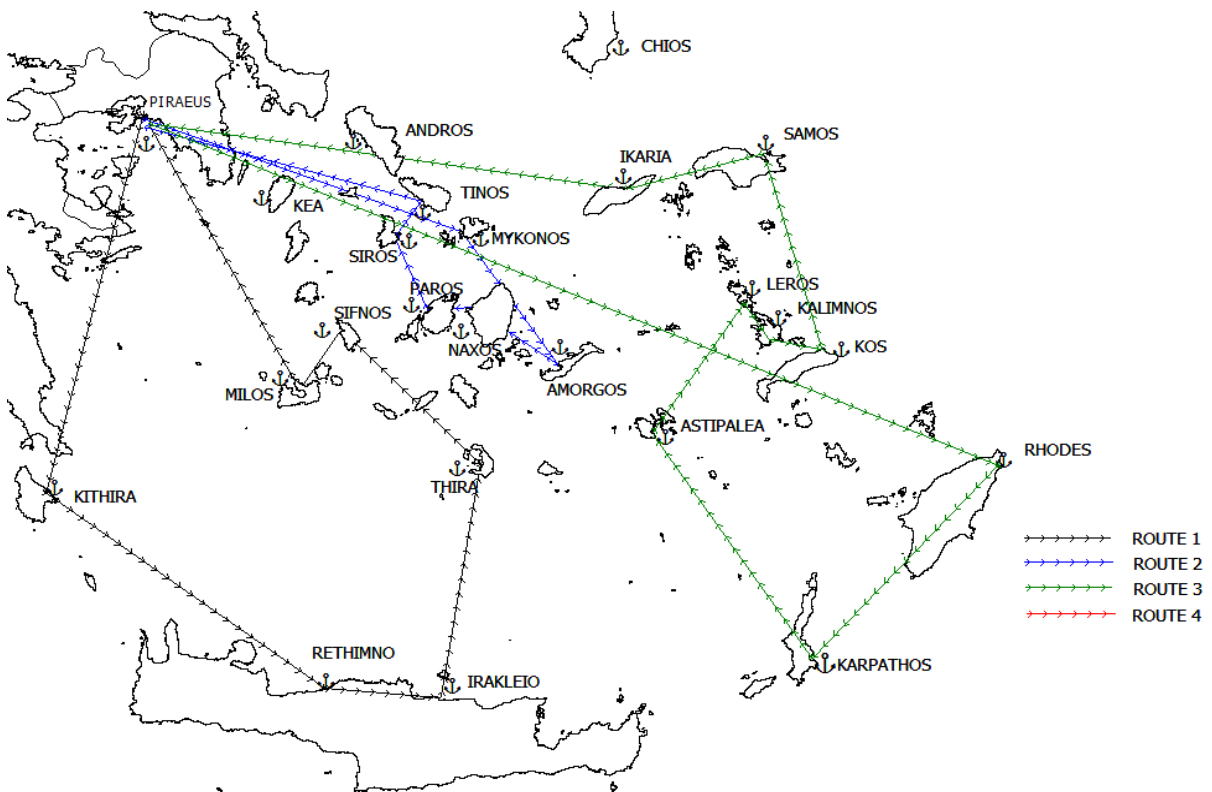


Σχήμα 6.13 Χαρτογραφική απεικόνιση των διαδρομών της βέλτιστης δρομολόγησης

Στα σχήματα 6.14 και 6.15 παρουσιάζονται, σε μεγαλύτερο επίπεδο λεπτομέρειας, οι διαδρομές στο Βόρειο και στο Νότιο Αιγαίο:



Σχήμα 6.14 Διαδρομή που καλύπτει τα νησιά του Βόρειου και Βορειοανατολικού Αιγαίου



Σχήμα 6.15 Διαδρομές που καλύπτουν τα νησιά του Νοτίου Αιγαίου

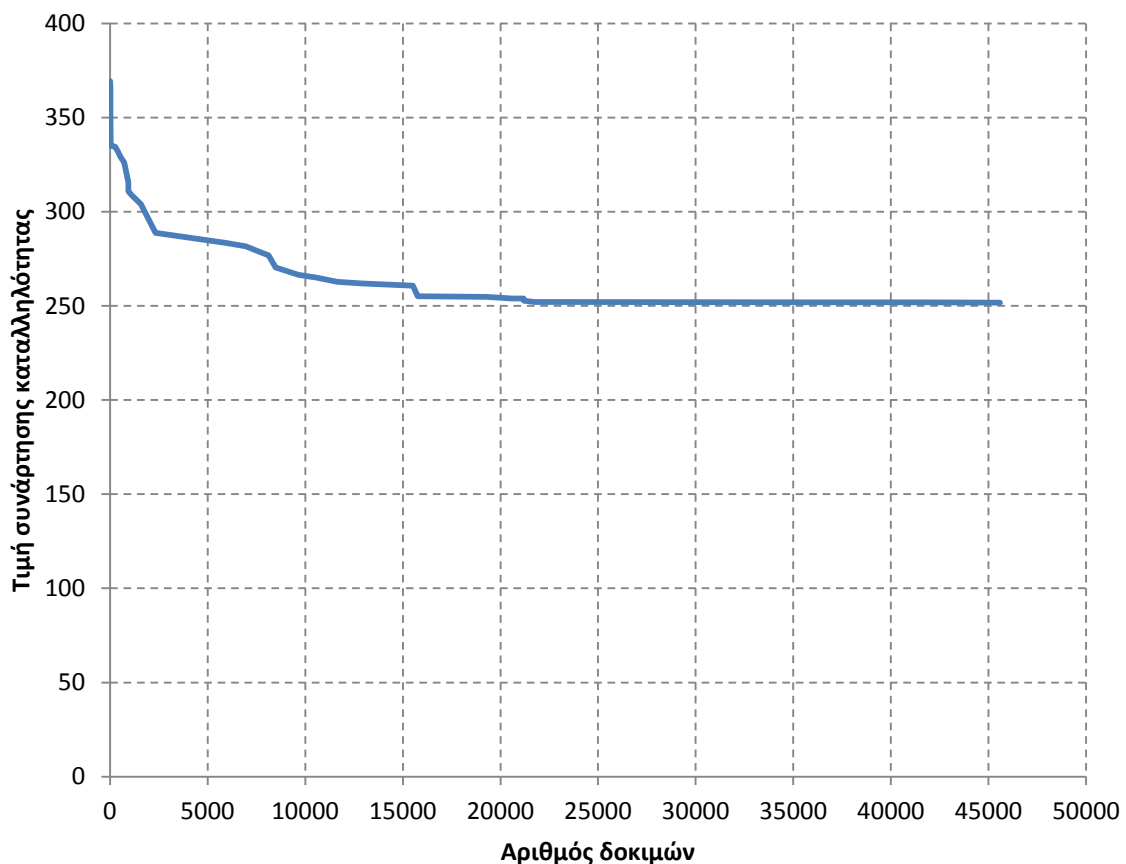
Ο αριθμός των διαδρομών που προέκυψαν στο πλαίσιο της βέλτιστης λύσης καθορίζει και το μέγεθος του στόλου που απαιτείται. Τέσσερα (4) όμοια πλοία δρομολογούνται στο παρόν δίκτυο για την υλοποίηση των εμπορευματικών μεταφορών, ένα (1) για κάθε διαδρομή. Ως εκ τούτου, απαιτείται ένας μικρός στόλος πλοίων για τα παραπάνω δρομολόγια, της τάξεως των 6 πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Για τον καθορισμό του μεγέθους του στόλου, λαμβάνεται υπόψη η περιοδική συντήρηση και η επισκευή των πλοίων, το ενδεχόμενο κάποιο από αυτά να τεθεί εκτος λειτουργίας λόγω βλάβης καθώς και η ανάγκη για μεγαλύτερη συχνότητα δρομολογίων σε περιόδους υψηλής ζήτησης. Τέλος, επειδή η χρονική βάση των δεδομένων προσφοράς-ζήτησης έχει ληφθεί εβδομαδιαία, το κάθε δρομολόγιο θα πραγματοποιείται μία φορά ανά εβδομάδα.

Όπως έχει τονιστεί, λόγω της φύσης του χρονικού περιορισμού υπάρχει η δυνατότητα καθυστέρησης άφιξης του πλοίου στον προορισμό του, σε μία ή περισσότερες από τις εξαγόμενες διαδρομές. Όσον αφορά τη βέλτιστη λύση, οι διαδρομές 1 και 2 ολοκληρώνονται εντός της καθορισμένης χρονικής προθεσμίας των 40 ωρών ενώ οι διαδρομές 3 και 4 παρουσιάζουν συνολικές καθυστερήσεις (υπερβάσεις του 40ωρου) 19,1 και 4,1 ωρών αντίστοιχα. Ειδικά για τη διαδρομή 3, που εξυπηρετεί τα Δωδεκάνησα και ορισμένα νησιά του Βορειοανατολικού Αιγαίου, λόγω των πολυάριθμων λιμένων από τους οποίους διέρχεται και λόγω της εκτεταμένης απόστασής τους από το λιμάνι του Πειραιά, είναι αναμενόμενη τέτοια εκτεταμένη υπέρβαση του μέγιστου χρονικού ορίου. Βέβαια, η χωρητικότητα του πλοίου αναφοράς (150 μικρών εμπορευματοκιβωτίων) συνηγορεί στην εμφάνιση μεγάλων δρομολογίων και ακολούθως καθυστερήσεων. Βάσει των παραπάνω, η μέση καθυστέρηση για κάθε διαδρομή διαμόρφωνεται στις 5,8 ώρες.

Τέλος, σχετικά με τον υπολογιστικό χρόνο του αλγορίθμου, για τους 24 συνδυασμούς παρατηρείται εύρος τιμών από 7 έως περίπου 20 λεπτά. Ο υπολογιστής όπου πραγματοποιήθηκε η υλοποίηση του αλγορίθμου διαθέτει μνήμη RAM 6GB και συχνότητα 2,26GHz. Οι διαφοροποιήσεις των χρόνων που παρατηρούνται συνδέονται και με την επιλογή των παραμέτρων και με τον τρόπο με τον οποίο ο γενετικός αλγόριθμος παράγει συνεχώς νέες λύσεις, αφού αντλεί τιμές από μία γεννήτρια τυχαίων αριθμών η οποία καθορίζεται αυτόματα από το λογισμικό επίλυσης του αλγορίθμου. Παράλληλα, σε όλες τις δοκιμές τέθηκαν μεγάλα χρονικά όρια μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού του αλγορίθμου, ώστε να εξαντληθεί κάθε πιθανότητα περαιτέρω βελτίωσης της συνάρτησης

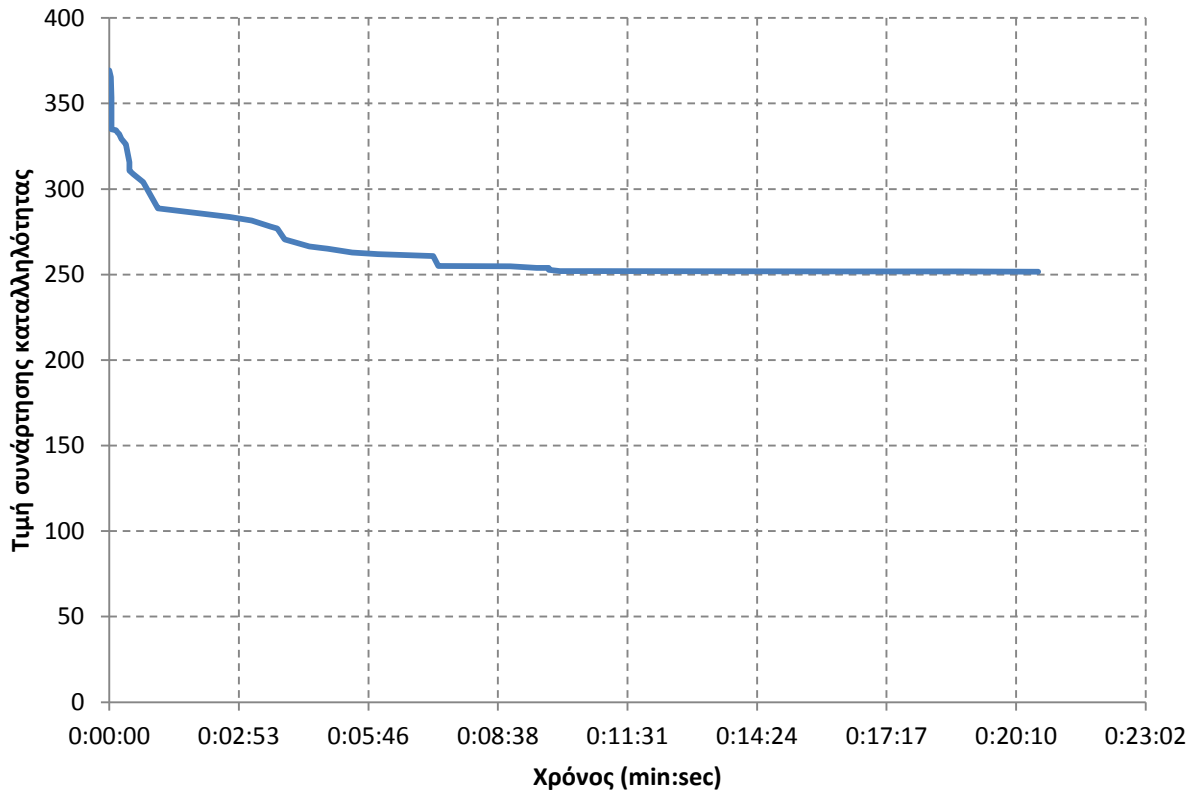
καταλληλότητας, για τον υπό διερεύνηση συνδυασμό. Στην εργασία των Karlaftis et al.(2009), για το αντίστοιχο πρόβλημα δρομολόγησης με ντετερμινιστικούς χρόνους διαδρομής ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου κυμαινόταν από 2 έως 4 λεπτά.

Για το συνδυασμό γενετικών τελεστών #14 που αντιστοιχεί στη βέλτιστη λύση, ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου ισούται με 8,40 λεπτά, ενώ μέχρι την ευρέση του εν λόγω συνδυασμού κόμβων πραγματοποιήθηκαν 45594 δοκιμές. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η εξέλιξη του αλγορίθμου κατά την εκτέλεση των δοκιμών:



Σχήμα 6.16 Εξέλιξη συνάρτησης καταλληλότητας κατά την εκτέλεση διαδοχικών δοκιμών του αλγορίθμου

Όπως είναι ξεκάθαρο από το σχήμα 6.13, στις πρώτες 5000 δοκιμές η μείωση του μέτρου καταλληλότητας είναι σημαντική (βελτίωση τάξεως 25% σε σχέση με την αρχική τιμή), ενώ στις τελευταίες 20000 δοκιμές δεν παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση, παρά μόνο μικρές διορθώσεις. Σε αυτή τη φάση, φαίνεται ότι η λύση έχει φτάσει κοντά στο βέλτιστό της σημείο. Σε επίπεδο χρονικής διάρκειας, η εξέλιξη της συνάρτησης καταλληλότητας κατά τη βέλτιστη επίλυση φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 6.17 Εξέλιξη συνάρτησης καταλληλότητας κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου

Αντίστοιχα με το προηγούμενο διάγραμμα, είναι εμφανές πως μετά τα πρώτα 9 λεπτά εκτέλεσης του αλγορίθμου, το ποσοστό βελτίωσης των παραγόμενων λύσεων μειώνεται σημαντικά. Κατά αυτόν τον τρόπο είναι εμφανές πως για πρακτικούς λόγους, μία αποδεκτή, -κοντά στη βέλτιστη- λύση μπορεί να επιτευχθεί μετά από από εκτέλεση του αλγορίθμου για περίπου 10 λεπτά, για τους καλύτερους συνδυασμούς παραμέτρων.

6.6.2 Εναλλακτική λύση δρομολόγησης

Μετά την επιλογή του συνδυασμού παραμέτρων, που παρέχει το καλύτερο αποτέλεσμα ως προς τη συνάρτηση καταλληλότητας του αλγορίθμου, συνεχίζεται η διερεύνηση για το συγκεκριμένο συνδυασμό. Κρατώντας τις παραμέτρους των γενετικών τελεστών σταθερές (πληθυσμό, διασταύρωση, μετάλλαξη), εκτελούνται και άλλες δοκιμές του αλγορίθμου με χρήση διαφορετικού αριθμού για την αρχικοποίηση της γεννήτριας τυχαίων αριθμών και με τα ίδια κριτήρια τερματισμού του αλγορίθμου. Στο πλαίσιο της αυτής διερεύνησης, εξάγεται άλλη μία λύση, κοντά στην ευρεθείσα βέλτιστη, με ελαφρώς αυξημένη τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας.

Πίνακας 6.8 Στοιχεία εναλλακτικής λύσης δρομολόγησης

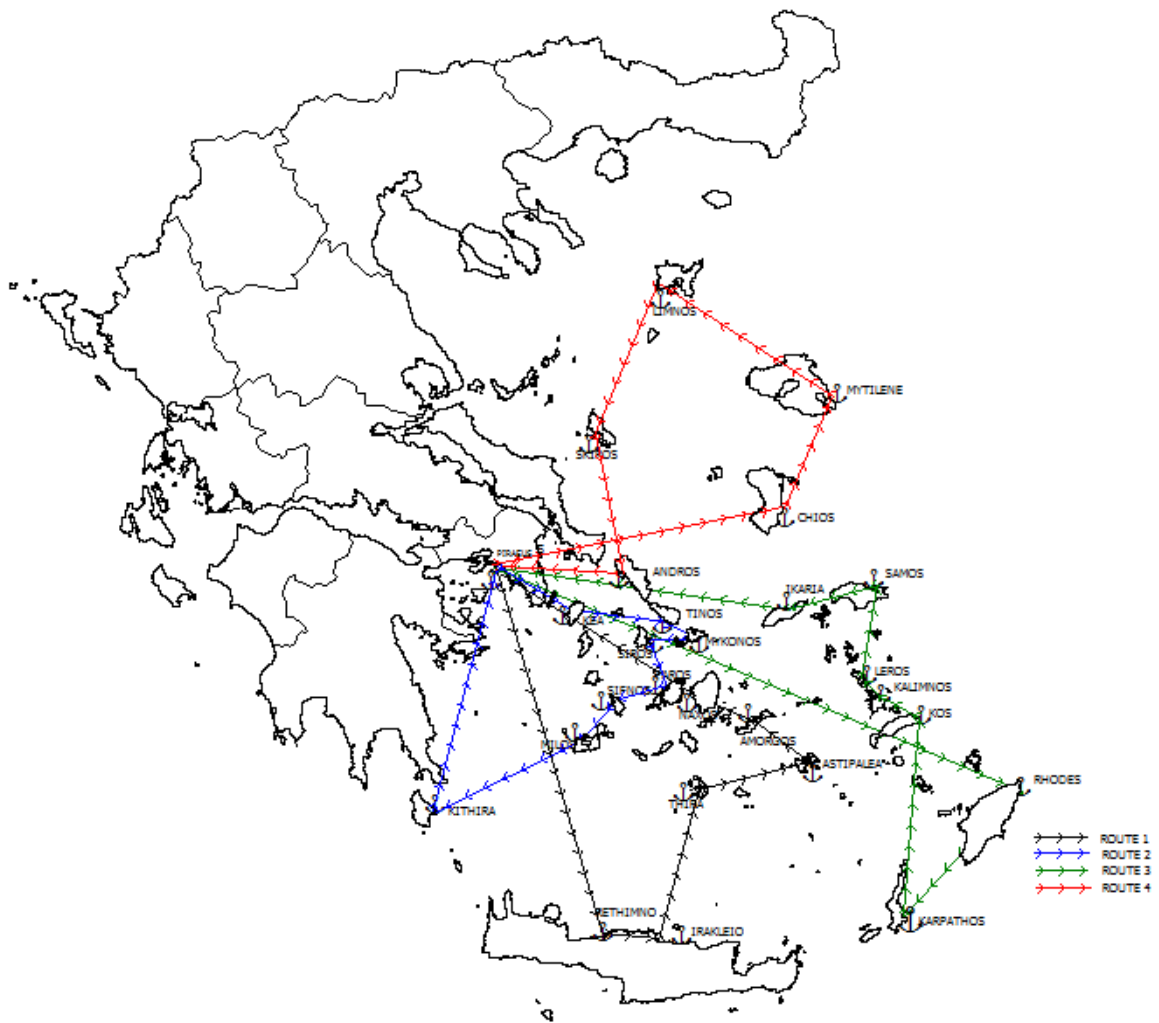
Α/Α	Πληθυσμός	Πιθανότητα διασταύρωσης	Πιθανότητα μετάλλαξης	Τιμή συνάρτησης καταλληλότητας	Υπολογιστικός χρόνος αλγορίθμου (min)	Αριθμός διαδρομών
26	50	0,20	0,1	252,7521	13,7	4

Το μέτρο καταλληλότητας της παρούσας λύσης είναι αυξημένο μόλις κατά 0,4% σε σχέση με την βέλτιστη που έχει βρεθεί. Ο αριθμός των διαδρομών δεν αλλάζει, κατ' επέκταση ούτε το μέγεθος του στόλου. Οι κόμβοι της κάθε διαδρομής και η σειρά που ακολουθείται κατά την πραγματοποίηση του κάθε δρομολογίου περιγράφονται ακολούθως:

Πίνακας 6.9 Περιγραφή διαδρομών εναλλακτικής δρομολόγησης

Α/Α ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ	ΛΙΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑ ΣΕΙΡΑ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ
1	Πειραιάς- Ρέθυμνο-Ηράκλειο-Θήρα-Αστυπάλαια-Αμοργός-Νάξος-Πειραιάς
2	Πειραιάς-Κέα-Τήνος-Μύκονος-Σύρος-Πάρος-Σίφνος-Μήλος-Κύθηρα-Πειραιάς
3	Πειραιάς-Ρόδος-Κάρπαθος-Κως-Κάλυμνος-Λέρος-Σάμος-Ικαρία-Πειραιάς
4	Πειραιάς-Χίος-Μυτιλήνη-Λήμνος-Σκύρος-Άνδρος-Πειραιάς

Η γεωγραφική χωροταξία των διαδρομών ακολουθεί την ίδια τάση με την προηγούμενη δρομολόγηση, δηλαδή μία διαδρομή ανά νησιωτικό σύμπλεγμα, με εξαίρεση τις Κυκλάδες που περιλαμβάνουν πολλά και μικρά νησιά, σε κοντινές αποστάσεις. Επίσης, είναι διακριτή η διατήρηση του βασικού κορμού των διαδρομών ανάμεσα στις δύο λύσεις, με διαφοροποιήσεις να εντοπίζονται στη σειρά εξυπηρέτησης των νησιών. Όσον αφορά την μέση καθυστέρηση ανά διαδρομή, εμφανίζεται αισθητά μειωμένη σε σχέση με την βασική λύση και κυμαίνεται περίπου στις 3,6 ώρες/διαδρομή. Βάσει των παραπάνω και η παρούσα δρομολόγηση θα μπορούσε να αποτελέσει ισοδύναμη πρόταση για την εμπορευματική μεταφορά στο Αιγαίο, κυρίως λόγω των περιορισμένων καθυστερήσεων. Σχηματικά, οι διαδρομές που απορρέουν από την εναλλακτική λύση συνοψίζονται παρακάτω:



Σχήμα 6.18 Χαρτογραφική απεικόνιση της εναλλακτικής δρομολόγησης

6.7 Ανάλυση ευαισθησίας

6.7.1 Γενικά

Προκειμένου να αξιολογηθεί η αποδοτικότητα του αλγορίθμου που δομήθηκε καθώς και η ευαισθησία του σε διάφορες μεταβολές, πραγματοποιείται η ανάλυση ευαισθησίας. Η ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis) μελετά την επίδραση που έχουν οι αλλαγές των παραμέτρων του μοντέλου του προβλήματος στα αποτελέσματά του και εν προκειμένω στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα δρομολόγησης, οι παράμετροι οι οποίοι μεταβάλλονται σχετίζονται άμεσα με τις παραδοχές του, οπότε η εκτίμηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης μπορεί να οδηγήσει σε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τη γενικότερη ισχύ του αλγορίθμου. Τέτοιες παράμετροι που μεταβάλλονται στην εν λόγω εφαρμογή είναι η χωρητικότητα του πλοίου αναφοράς, το μέγιστο χρονικό όριο διαδρομής, το ποσοστό προσαύξησης της καταλληλότητας σε περίπτωση καθυστέρησης του πλοίου καθώς και το επίπεδο εμπιστοσύνης για τον καθορισμό των χρόνων διαδρομής. Βάσει αυτών των μεταβολών, διερευνώνται αντίστοιχα σενάρια, για καθένα εκ των οποίων εκτελείται ο γενετικός αλγόριθμος. Σημειώνεται ότι για κάθε νέα εκτέλεση του ΓΑ διατηρούνται οι παράμετροι των γενετικών τελεστών, οι οποίοι παρέχουν το βέλτιστο αποτέλεσμα κατά την επίλυση του κυρίου προβλήματος (παράμετροι: μέγεθος πληθυσμού=50, πιθανότητα διασταύρωσης=0,2, πιθανότητα μετάλλαξης=0,1). Παρακάτω, παρουσιάζονται τα διάφορα σενάρια που προκύπτουν από την αλλαγή των παραμέτρων.

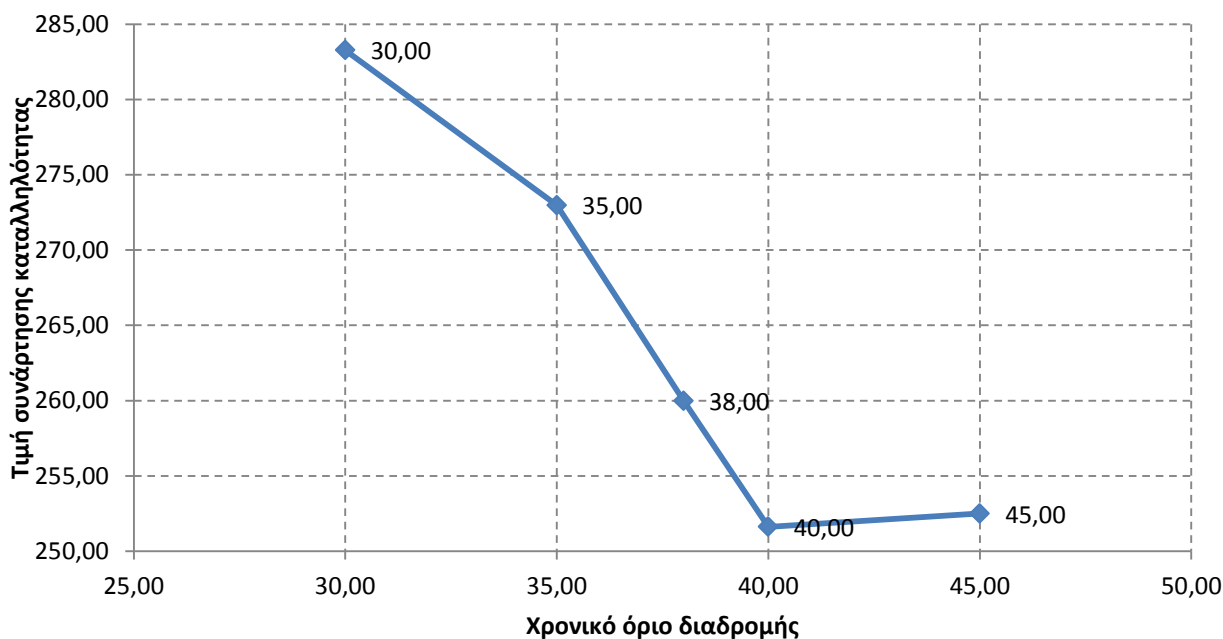
6.7.2 1^ο σενάριο: Μεταβολή του μέγιστου χρόνου διαδρομής

Κατά τη διατύπωση και την επίλυση του προβλήματος, θεωρήθηκε ότι το πλοίο από την αναχώρηση του από το εμπορευματικό λιμένα του Πειραιά, υποχρεούται να εξυπηρετήσει και το τελευταίο λιμάνι της διαδρομής του μέσα σε διάστημα 40 ωρών. Σε αυτό το σενάριο εξετάζεται το ενδεχόμενο ο μέγιστος αυτός χρόνος διαδρομής να λαμβάνει τιμές 30, 35, 38 και 45 ωρών. Για τις παραπάνω τιμές, τα αποτελέσματα του ΓΑ συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.10 Αποτελέσματα αλγορίθμου για διάφορες τιμές του μέγιστου χρόνου διαδρομής

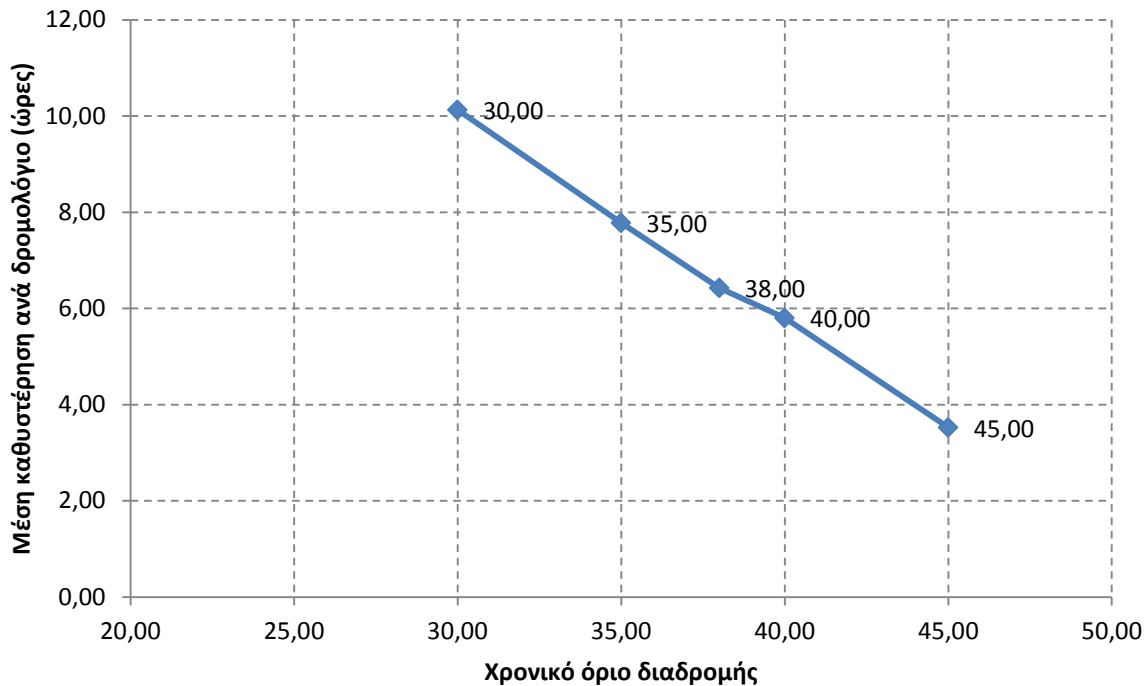
Πληθυσμός	Πιθανότητα διασταύρωσης	Πιθανότητα μετάλλαξης	Τιμή συνάρτησης καταλληλότητας	Μέγιστος χρόνος διαδρομής	Μέση Καθυστέρηση (ώρες)	Αριθμός διαδρομών
50,00	0,20	0,10	283,28	30,00	10,13	4,00
50,00	0,20	0,10	272,98	35,00	7,78	4,00
50,00	0,20	0,10	259,98	38,00	6,43	4,00
50,00	0,20	0,10	251,62	40,00	5,80	4,00
50,00	0,20	0,10	252,50	45,00	3,53	4,00

Υπενθυμίζεται ότι η χωρητικότητα του πλοίου αναφοράς καθώς και οι υπόλοιποι περιορισμοί του προβλήματος παραμένουν σταθεροί. Τα αποτελέσματα που διαφοροποιούνται, ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου, είναι το μέτρο καταλληλότητας και η πιθανή καθυστέρηση. Σχηματικά, η διαφοροποίηση αυτή παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 6.19 Τιμές συνάρτησης καταλληλότητας για διάφορα μέγιστα χρονικά όρια διαδρομής

Από το διάγραμμα 6.16 εξάγεται πως όσο ο μέγιστος επιτρεπτός χρόνος διαδρομής αυξάνεται, τόσο η τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας μειώνεται. Χαρακτηριστικά, το μέτρο καταλληλότητας μειώνεται κατά 11% για μετάβαση του χρονικού ορίου από τις 30 ώρες στις 45 ώρες. Μεταξύ των τιμών 40 και 45 ωρών, η συνάρτηση καταλληλότητας αυξάνεται ελάχιστα(0,4%), σε σημείο που να θεωρείται πρακτικά αμετάβλητη.



Σχήμα 6.20 Μέση χρονική καθυστέρηση για διάφορα μέγιστα χρονικά όρια διαδρομής

Όπως είναι αναμενόμενο, καθώς ο μέγιστος χρόνος διαδρομής αυξάνεται, η μέση καθυστέρηση ανά διαδρομή μειώνεται, διότι το πλοίο έχει περισσότερο διαθέσιμο χρόνο να εξυπηρετήσει τα νησιά του δικτύου και οι υπερβάσεις των χρονικών ορίων γίνονται όλο και μικρότερες. Φυσικά, για μικρά χρονικά περιθώρια διαδρομής (30, 35 ώρες) οι καθυστερήσεις εκτοξεύονται σε διάρκεια. Χαρακτηριστικά, η καθυστέρηση για χρονικό περιθώριο 30 ωρών είναι περίπου 3 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη για 45 ώρες. Οι πρόσθετες καθυστερήσεις στα μικρά χρονικά περιθώρια αποτελεί και τον κύριο λόγο αύξησης της συνάρτησης καταλληλότητας.

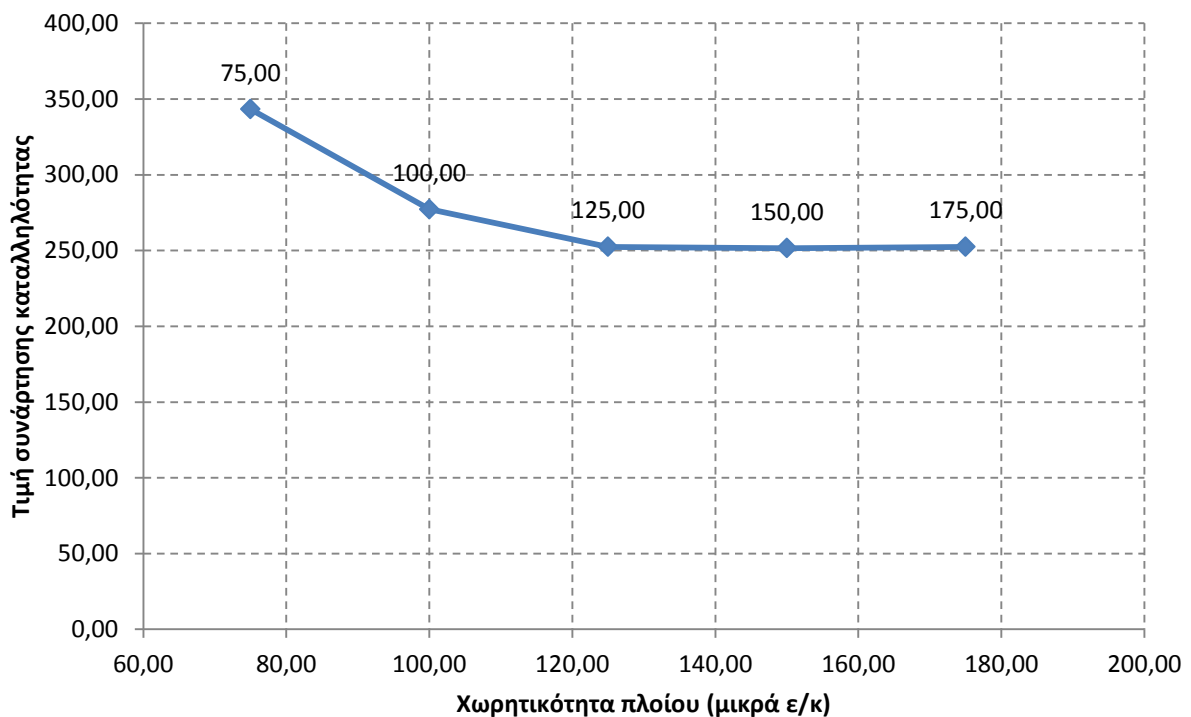
6.7.3 2^ο σενάριο: Μεταβολή της χωρητικότητας του πλοίου αναφοράς

Το πλοίο αναφοράς του προβλήματος έχει χωρητικότητα 150 μικρά εμπορευματοκιβώτια. Η χωρητικότητα, όμως, των πλοίων που τροφοδοτούν τα νησιά του Αιγαίου (feeder ships) ποικίλει και για αυτό το λόγο εξετάζεται η ευαισθησία του αλγορίθμου σε μεταβολές της μεταφορικής ικανότητας του στόλου. Πιο συγκεκριμένα, στο σενάριο αυτό διερευνάται η απόκριση του αλγορίθμου όταν η χωρητικότητα λαμβάνει τιμές 75, 100, 125 και 175. Τα αποτελέσματα για αυτές τις τιμές συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 1.11 Αποτελέσματα αλγορίθμου για διάφορες τιμές χωρητικότητας

Πληθυσμός	Πιθανότητα διασταύρωσης	Πιθανότητα μετάλλαξης	Χωρητικότητα πλοίου	Τιμή συνάρτησης καταλληλότητας	Μέση καθυστέρηση (ώρες)	Αριθμός διαδρομών
50,00	0,20	0,10	75,00	343,30	0,00	7,00
50,00	0,20	0,10	100,00	277,28	0,00	5,00
50,00	0,20	0,10	125,00	252,43	3,18	4,00
50,00	0,20	0,10	150,00	251,62	5,80	4,00
50,00	0,20	0,10	175,00	252,45	6,90	3,00

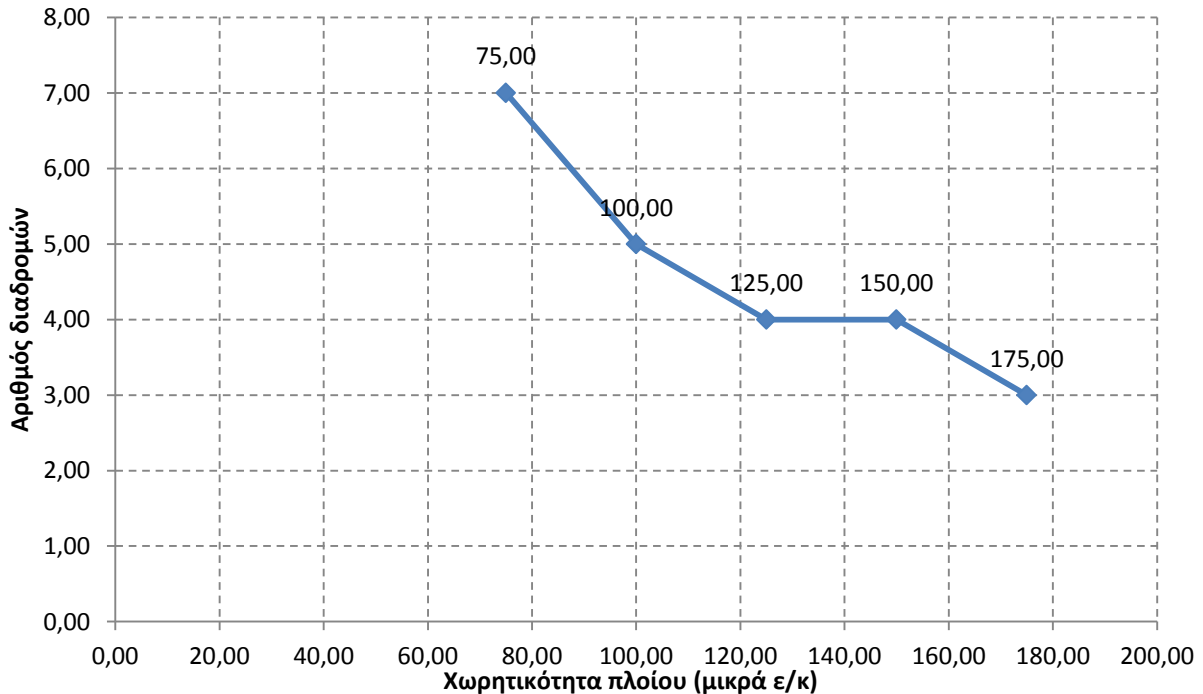
Επαναλαμβάνεται ότι όλες οι υπόλοιπες παράμετροι του προβλήματος παραμένουν σταθεροί (*ceteris paribus*). Στην παρούσα περίπτωση, πέρα από την τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας και τη μέση καθυστέρηση ανά διαδρομή, μεταβάλλεται και ο αριθμός των απαιτούμενων διαδρομών. Τα διαγράμματα της κάθε επιμέρους μεταβολής παρουσιάζονται παρακάτω:



Σχήμα 6.21 Τιμές συνάρτησης καταλληλότητας για διάφορες τιμές χωρητικότητας πλοίου

Από το διάγραμμα χωρητικότητας-μέτρου καταλληλότητας, προκύπτει πως καθώς η χωρητικότητα του πλοίου αυξάνεται, η τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας μειώνεται. Από τη χωρητικότητα των 75 ε/κ, που αποτελεί μία μικρή χωρητικότητα για τέτοιου είδους πλοία, μέχρι αυτή των 125 ε/κ, παρατηρείται μία μείωση του μέτρου καταλληλότητας της

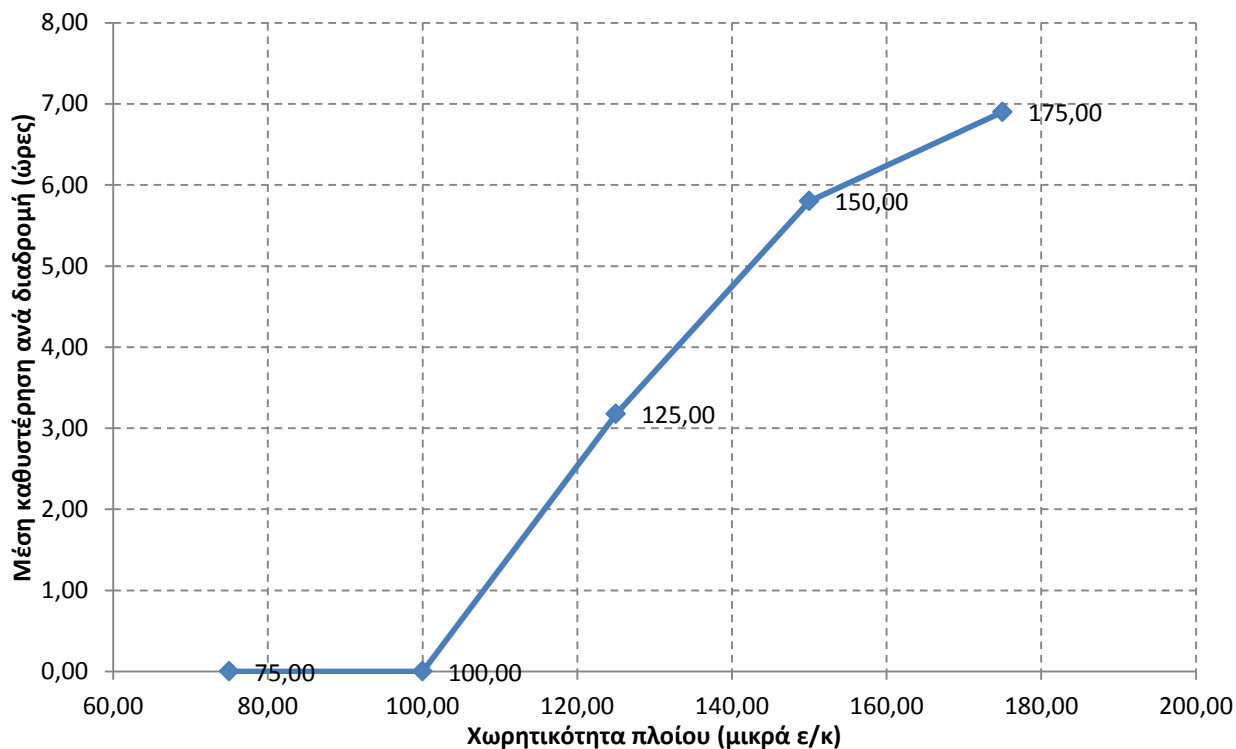
τάξης του 27%. Από την τιμή αυτή και μετά, η καταλληλότητα παραμένει πρακτικά αμετάβλητη. Η ερμηνεία της συμπεριφοράς της ΣΚ συνδέεται άμεσα με την τάση που εμφανίζει ο αριθμός των διαδρομών και η μέση καθυστέρηση ανά διαδρομή.



Σχήμα 6.22 Αριθμός διαδρομών για διάφορες τιμές χωρητικότητας πλοίου

Είναι εμφανές πως η αύξηση της χωρητικότητας πλοίου οδηγεί σε μείωση του απαιτούμενου αριθμού διαδρομών. Η τάση αυτή εκπορεύεται από τη δομή του αλγορίθμου, όπου για την εξαγωγή των διαδρομών απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η εξάντληση της χωρητικότητας. Κατά συνέπεια, αύξηση της χωρητικότητας ισοδυναμεί με αύξηση της μεταφορικής ικανότητας και συνεπώς με αύξηση των εξυπηρετούμενων κόμβων. Χαρακτηριστικά, για χωρητικότητα 75 €/κ απαιτούνται 7 διαδρομές (με μικρό αριθμός νησιών ανά διαδρομή), ενώ όταν αυτή αυξάνεται σε 175, απαιτούνται μόλις 3 διαδρομές, καθεμία εκ των οποίων καλύπτει εκτεταμένο τμήμα του Αιγαίου.

Βέβαια, ο αριθμός των διαδρομών ανά ενδεχόμενο χωρητικότητας επηρεάζει και τη μέση καθυστέρηση ανά διαδρομή, όπως διακρίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 6.23 Μέση χρονική καθυστέρηση για διάφορα τιμές χωρητικότητας πλοίου

Στις μικρές χωρητικότητες πλοίων (75,100 ε/κ), ο μεγάλος αριθμός των διαδρομών οδηγεί στην πλήρη απαλοιφή των καθυστερήσεων, δεδομένου του μικρού αριθμού εξυπηρετούμενων κόμβων ανά διαδρομή. Αντίθετα, στις μεγάλες χωρητικότητες, ενώ οι διαδρομές μειώνονται η μέση καθυστέρηση ανά διαδρομή αυξάνεται κατακόρυφα λόγω της έκτασης της κάθε διαδρομής. Η τάση αυτή των καθυστερήσεων εκπορεύεται από τη φύση των περιορισμών που έχουν τεθεί: ο αλγόριθμος στηρίζεται i) στον ισχυρό και απaráβατο περιορισμό της χωρητικότητας, βάσει του οποίου οι διαδρομές που σχηματίζονται αντιστοιχούν σε έμφορτη πληρότητα που προσεγγίζει το 100% του πλοίου και ii) στον ασθενή περιορισμό των χρονικών ορίων, ο οποίος, όμως, μπορεί να παραβιαστεί.

Επίσης, η εξέλιξη των καθυστερήσεων και η κυρίως η τιμή τους για κάθε ενδεχόμενο χωρητικότητας, η οποία αξιολογείται ως χαμηλή σε σχέση με τα δεδομένα και την αβεβαιότητα που εμφανίζονται στις πραγματικές συνθήκες της ναυτιλίας, αποτελεί απόδειξη του υψηλού ποσοστού προσάυξης της ΣΚ (50%). Το πλαίσιο επιβολής ποινών αξιολογείται ως αυστηρό και οι καθυστερήσεις δεν προσεγγίζουν μη ανεκτές τιμές. Για αυτό και εμφανίζεται η ανάγκη για γενικότερη διερεύνηση του ποσοστού της ποινής, ώστε να ταυτοποιηθεί η συμπεριφορά του αλγορίθμου σε λιγότερο ή περισσότερα ανεκτά στις

καθυστερήσεις περιβάλλοντα. Στην κατεύθυνση αυτή, εξετάζεται το επόμενο σενάριο για μεταβολή του ποσοστού ποινής λόγω καθυστερήσεων.

6.7.4 3^ο σενάριο: Μεταβολή της παραμέτρου ποινής λόγω καθυστερήσεων

Βάσει του προηγούμενου σεναρίου συνάγεται ότι η ύπαρξη καθυστερήσεων και το μέγεθός τους δεν αποτελεί συνάρτηση μόνο της χωρητικότητας του πλοίου αλλά και της παραμέτρου «ποινής» που προκαθορίζεται. Η επιλογή της χωρητικότητας του πλοίου επηρεάζει τον αριθμό των διαδρομών και το μέγεθος των καθυστερήσεων δεδομένου του ισχυρού περιορισμού του αλγορίθμου, αλλά και το μέγεθος του συντέλεστη προσάυξης μπορεί μεν να μην καταργεί τις καθυστερήσεις (ένεκα του ασθενούς περιορισμού), αλλά επιδρά αποφασιστικά στον καθορισμό της συνολικής διάρκειάς τους. Στο κύριο πρόβλημα που επιλύθηκε, επιλέχθηκε ένα αυστηρό πλαίσιο ποινής για την υπέρβαση του μέγιστου χρόνου διαδρομής (50% προσάυξη της συνάρτησης καταλληλότητας επί της υπαρκτής καθυστέρησης).

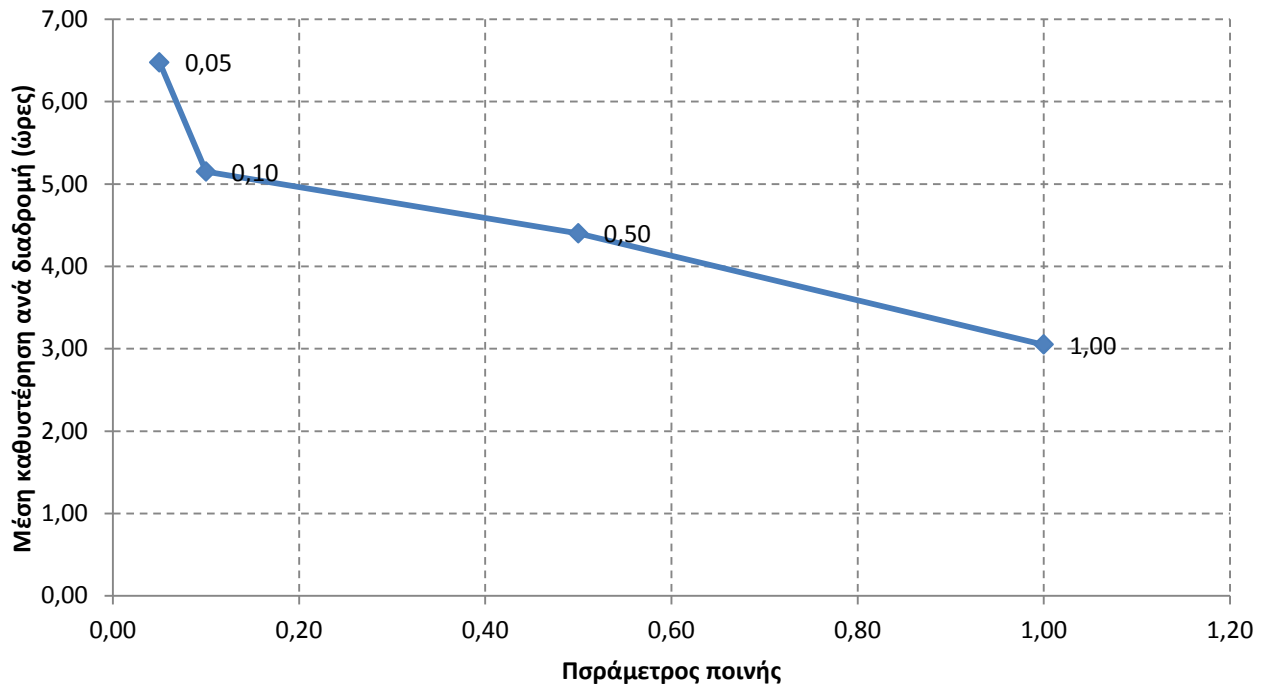
Για την υπό εξέταση μεταβολή της παραμέτρου ποινής, επιλέγεται ένα πιο αυστηρό χρονικό όριο διαδρομών της τάξης των 35 ωρών ενώ η χωρητικότητα του πλοίου παραμένει στα 150 μικρά εμπορευματοκιβώτια. Υπό αυτές τις παραδοχές, τίθενται οι προϋποθέσεις για μια πιο σαφή εικόνα της τάσης των καθυστερήσεων. Ο ΓΑ εκτελείται για τιμές παραμέτρων ποινής 0,05, 0,10, 0,5 και 1.

Πίνακας 6.12 Αποτελέσματα αλγορίθμου για διάφορες τιμές παραμέτρου καθυστέρησης

Πληθυσμός	Πιθανότητα διασταύρωσης	Πιθανότητα μετάλλαξης	Τιμή συνάρτησης καταλληλότητας	Μέγιστος χρόνος διαδρομής (ώρες)	Χωρητικότητα πλοίου	Μέση καθυστέρηση ανά διαδρομή (ώρες)	Παράμετρος ποινής για καθυστέρηση
50,00	0,20	0,10	254,84	35,00	150,00	6,48	0,05
50,00	0,20	0,10	259,51	35,00	150,00	5,15	0,10
50,00	0,20	0,10	259,51	35,00	150,00	4,40	0,50
50,00	0,20	0,10	265,76	35,00	150,00	3,05	1,00

Στο παρακάτω διάγραμμα, οπτικοποιείται η πορεία εξέλιξης της μέσης καθυστέρησης ανά διαδρομή, σε σχέση με την παράμετρο ποινής. Όπως είναι αναμενόμενο, μικρά ποσοστά προσάυξης (5% και 10%) επιφέρουν μεγάλης διάρκειας μέσες καθυστερήσεις. Αντίθετα,

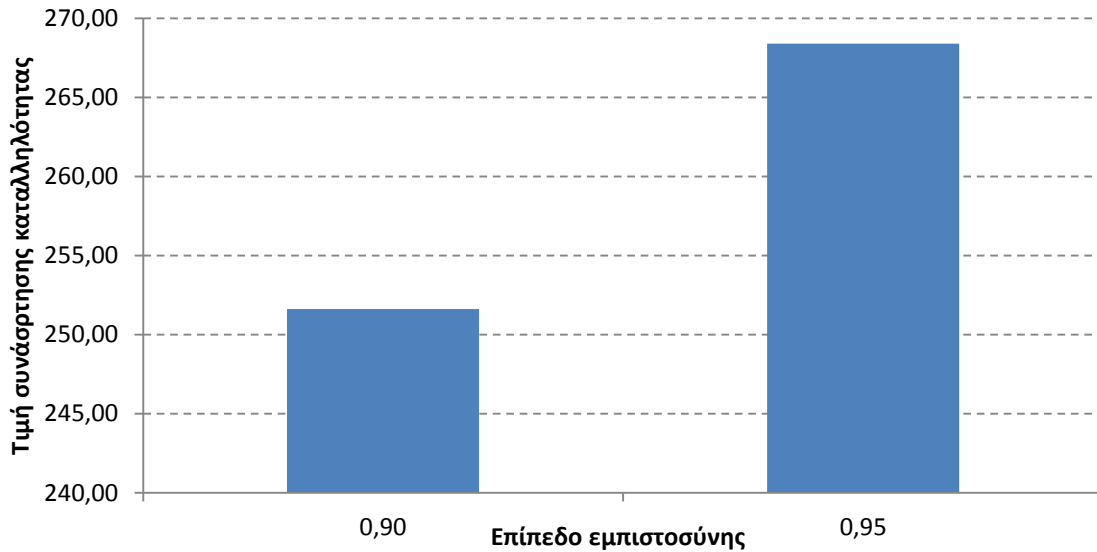
παρατηρείται πως όταν η τιμή της παραμέτρου ισούται με τη μονάδα, η καθυστέρηση υποδιπλασιάζεται. Η επίδραση του περιορισμού σχετικά με το χρονικό όριο διαδρομής στον καθορισμό των καθυστερήσεων και εν γένει στο συνολικό χρόνο του πλοίου εν πλω είναι προφανής.



Σχήμα 6.24 Μέση καθυστέρηση για διάφορες παραμέτρους ποινής

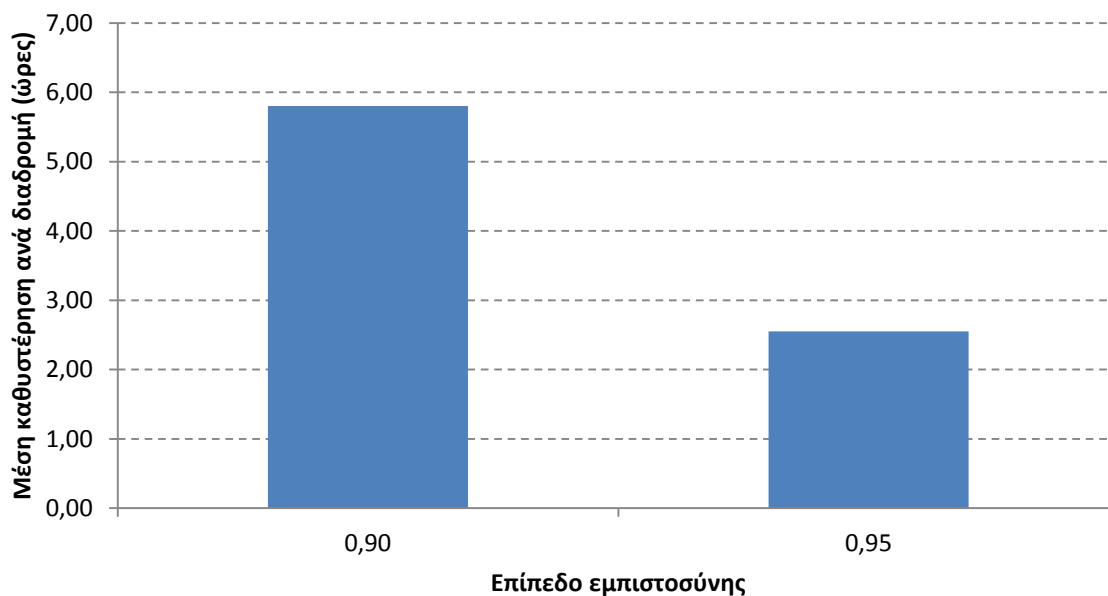
6.7.5 4^ο σενάριο: Μεταβολή του επιπέδου εμπιστοσύνης για τους χρόνους διαδρομής

Κατά την επίλυση του βασικού προβλήματος δρομολόγησης, ως επίπεδο εμπιστοσύνης για την εκτίμηση των χρόνων διαδρομής θεωρήθηκε η τιμή $\alpha=0,90$. Η βάση των όσων περιγράφηκαν στην ενότητα 6.4, δομείται ένας νέος πίνακας με τους νέους χρόνους διαδρομής που αντιστοιχούν στο 95% της αθροιστικής πιθανότητας $F(V)$. Με τους νέους αυτούς χρόνους, που είναι αυξημένοι σε σχέση με το προηγούμενο επίπεδο εμπιστοσύνης, εκτελείται ο γενετικός αλγόριθμος διατηρώντας όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους του προβλήματος σταθερές.



Σχήμα 6.25 Τιμή συνάρτησης καταλληλότητας για διαφορετικά επίπεδα εμπιστοσύνης

Τα αποτελέσματα που διαφοροποιούνται αφορούν στη συνάρτηση καταλληλότητας και στη μέση καθυστέρηση ανά διαδρομή. Το παραπάνω διάγραμμα καταδεικνύει την αύξηση κατά 6,7% της συνάρτησης καταλληλότητας για αύξηση του επιπέδου εμπιστοσύνης από 90% σε 95%. Δε συμβαίνει το ίδιο όμως και με τις καθυστερήσεις.



Σχήμα 6.26 Μέση καθυστέρηση για διάφορα επίπεδα εμπιστοσύνης

Όπως είναι ορατό από το παραπάνω γράφημα, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, η μέση καθυστέρηση ανά διαδρομή είναι σχεδόν η μισή σε σχέση με την αντίστοιχη για επίπεδο εμπιστοσύνης 90%. Πρακτικά, η αύξηση των χρόνων διαδρομής λόγω αυστηροποίησης της

πιθανότητας επιλογής, οδηγεί σε επανασχεδιασμό των διαδρομών με μείωση του αριθμού των κόμβων εξυπηρέτησης στις διαδρομές προς τα πιο απομακρυσμένα νησιά. Για του λόγου το αληθές, η διαδρομή προς τα Δωδεκάνησα σε αυτή την περίπτωση αποτελείται από 6 νησιωτικούς λιμένες έναντι 8 στην κύρια λύση, ομοία τάση εντοπίζεται και στη διαδρομή προς το Βορειοανατολικό Αιγαίο. Η μείωση των κόμβων στις εκτεταμένες διαδρομές, που αποτελούν την βασική πηγή καθυστερήσεων στην περίπτωση του 90%, έχουν ως αποτέλεσμα την παρατηρούμενη μείωση στη μέση καθυστέρηση ανά διαδρομή. Παράλληλα, η συνολική αύξηση των χρόνων διαδρομής συνεπάγεται ανάλογη αύξηση και της συνάρτησης καταλληλότητας, δεδομένου ότι οι χρόνοι εξυπηρέτησης επί των λιμένων παραμένουν σταθεροί.

6.8 Σύγκριση με προηγούμενη ερευνητική εργασία




Όπως έχει αναφερθεί οι Karlaftis et al. (2009) διερεύνησαν παρόμοιο πρόβλημα δρομολόγησης πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, για ένα δίκτυο 25 νησιών στο Αιγαίο πέλαγος, με ταυτόχρονη παραλαβή και παράδοση εμπορευμάτων, λαμβάνοντας όμως τους χρόνους διαδρομής ως ντετερμινιστικούς. Στην παρούσα ενότητα, επιλύεται το πρόβλημα που τέθηκε από τους συγγραφείς, με την παραδοχή όμως της στοχαστικότητας των χρόνων διαδρομής. Το δίκτυο των 25 νησιών εμπεριέχεται στο δίκτυο που εξετάστηκε, οπότε οι κατανομές των χρόνων διαδρομής είναι γνωστές, ενώ τα στοιχεία προσφοράς και ζήτησης είναι τα ίδια. Οι παράμετροι του προβλήματος που επεξεργάστηκαν οι Karlaftis et al. (2009) είναι οι κάτωθι:

Πίνακας 6.13 Παράμετροι του προβλήματος που διατυπώθηκε από τους Karlaftis et al. (2009)

Παράμετρος	Τιμή στην εργασία των Karlaftis et al. (2009)
Χωρητικότητα πλοίου	100 μικρά εμπορευματοκιβώτια
Χρονικό όριο διαδρομής	40 ώρες μέχρι την εξυπηρέτηση του τελευταίου κόμβου
Παράμετρος καθυστέρησης πλοίου	5% προσαύξηση επί της συνάρτησης καταλληλότητας

Η επίλυση του προβλήματος γίνεται για θεώρηση του 90% της πιθανοτικής κατανομής των χρόνων διαδρομής. Η προσαύξηση των χρόνων, λόγω της στοχαστικής θεώρησης, κυμαίνεται ποσοστιαία από 4,5% έως 12%, ανάλογα το ζεύγος ΠΠ. Με δεδομένα εισόδου τις παραπάνω παραμέτρους καθώς και τις στοχαστικά αναθεωρημένες χρονικές αποστάσεις, εκτελείται ο αλγόριθμος, διατηρώντας σταθερό το συνδυασμό παραμέτρων του ΓΑ, που αντιστοιχεί στη βέλτιστη λύση του αρχικού προβλήματος. Ως κριτήριο τερματισμού ορίστηκε η συνθήκη μη βελτίωσης της συνάρτησης καταλληλότητας για 30.000 συνεχόμενες δοκιμές.

Πίνακας 6.14 Σύγκριση αποτελεσμάτων

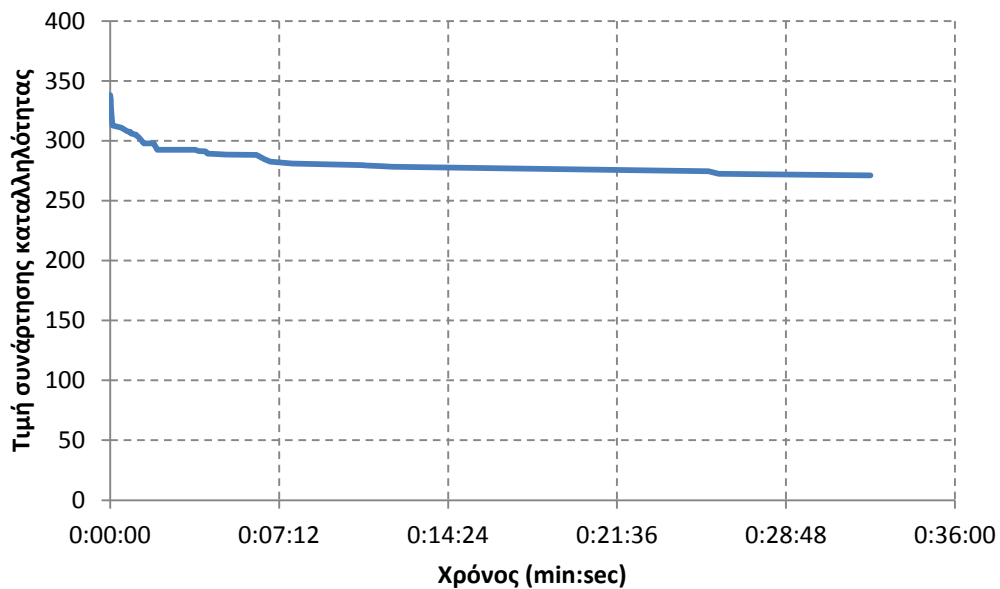
Αποτελέσματα	Karlaftis et al. (2009)	Παρούσα διπλωματική εργασία	Τάση μεταβολής
Τιμή συνάρτησης καταλληλότητας	260,22	271,07	
Αριθμός διαδρομών	5,00	5,00	
Μέση καθυστέρηση ανά διαδρομή (ώρες)	0,00	2,05	

Η συνάρτηση καταλληλότητας εμφανίζει αύξηση 4,2%, στην περίπτωση των στοχαστικών χρόνων διαδρομής. Ο αριθμός των διαδρομών παραμένει αμετάβλητος, δεδομένου ότι η χωρητικότητα του πλοίου αναφοράς δεν αλλάζει κατά την επίλυση, ενώ η μέση καθυστέρηση παρουσιάζει σαφώς αυξητική τάση. Η άνοδος τόσο της τιμής της ΣΚ όσο και της διάρκειας καθυστέρησης αποδίδεται στους αυξημένους χρόνους διαδρομής, αφού η φύση των περιορισμών στη δομή του αλγορίθμου δεν αλλάζει. Πιο αναλυτικά, οι αλλαγές που προκύπτουν στη σύνθεση και στη σειρά εξυπηρέτησης της κάθε διαδρομής είναι εμφανείς στον πίνακα 6.15 όπου αναλύονται οι διαδρομές και στις 2 προσεγγίσεις. Η γεωγραφική διασπορά των δρομολογίων δε διαφοροποιείται, δεδομένου ότι και με τη νέα επίλυση οι διαδρομές προς τα απομακρυσμένα και μεγάλα νησιά συμπεριλαμβάνουν λίγους κόμβους εξυπηρέτησης (3-4 ανά διαδρομή), ενώ εκείνες προς τα μικρότερα και εγγύτερα στον Πειραιά νησιά διέρχονται από σαφώς περισσότερα λιμάνια.

Πίνακας 6.15 Διαδρομές αναλυτικά για κάθε επίλυση

Ονομασία διαδρομής	Karlaftis et al. (2009)	Παρούσα διπλωματική εργασία
Διαδρομή #1	PIR-KIT-RET-IRA-PIR	PIR-KIT-RET-IRA-PIR
Διαδρομή #2	PIR-MIL-SIF-THI-AST-AMO-NAX-PAR-PIR	PIR-MIL-SIF-PAR-MYK-TIN-SYR-KEA-PIR
Διαδρομή #3	PIR-SIR-TIN-MYK-IKA-SAM-AND-KEA-PIR	PIR-NAX-THI-AST-KAL-SAM-IKA-PIR
Διαδρομή #4	PIR-KAL-KOS-RHO-KAR-PIR	PIR-KOS-RHO-KAR-AMO-PIR
Διαδρομή #5	PIR-SKI-LIM-MYT-CHI-PIR	PIR-CHI-MYT-LIMN-SKY-AND-PIR

Πιο αναλυτικά, η διαδρομή #1 προς την Κρήτη παραμένει ακριβώς η ίδια και με τη νέα επίλυση, ενώ μικρή μεταβολή παρουσιάζει και η διαδρομή #4 που αφορά κυρίως την περιοχή των Δωδεκανήσων. Αντίθετα, οι διαδρομές #2 και #3 διαφοροποιούνται αισθητά, με τη νέα διαδρομή #3 να διέρχεται από Κυκλάδες, Δωδεκάνησα και νησιά του Βορειοανατολικού Αιγαίου. Τέλος, η διαδρομή #5 με βασικό προορισμό το Βόρειο/Βορειοανατολικό Αιγαίο, χαρακτηρίζεται από ολική αλλαγή της σειράς εξυπηρέτησης των λιμένων. Σχετικά με τον υπολογιστικό χρόνο για την εύρεση της βέλτιστης τιμής, η εξέλιξη της συνάρτησης καταλληλότητας παρουσιάζεται στο κάτωθι διάγραμμα:



Σχήμα 6.27 Εξέλιξη συνάρτησης καταλληλότητας κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου

Είναι ευδιάκριτη η σταδιακή πτώση της τιμής της συνάρτησης καταλληλότητας, ενώ μετά την παρέλευση 25 λεπτών συνεχόμενων δοκιμών, προσεγγίζεται η βέλτιστη λύση. Μέχρι την εύρεση της βέλτιστης πραγματοποιήθηκαν περίπου 72000 επαναλήψεις της διαδικασίας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε στην εν λόγω περίπτωση, μία παρόμοια διερεύνηση της επίλυσης για διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων, όπως στην επίλυση του βασικού προβλήματος δρομολόγησης παραπάνω. Δεδομένου ότι το δίκτυο σε αυτή την περίπτωση είναι ελαφρώς διαφοροποιημένο, υπάρχει το ενδεχόμενο κάποιος άλλος συνδυασμός παραμέτρων του ΓΑ, διαφορετικός από το θεωρούμενο, να παρέχει γρηγορότερη και ποιοτικότερη λύση.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Το Κεφάλαιο 7 παρέχει μια γενική ανασκόπηση των στόχων, της μεθοδολογίας και των αποτελεσμάτων που εκπορεύονται από τη διερεύνηση του προβλήματος δρομολόγησης, ενώ παράλληλα επισημαίνονται τα κομβικά σημεία και τα συμπεράσματα από την εφαρμογή του προτεινόμενου αλγορίθμου, σε μια απόπειρα συνολικής αποτίμησής του. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την αποσαφήνιση ορισμένων πτυχών του προβλήματος που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής και μελέτης.

7.1 Γενικά στοιχεία- Αποτελέσματα και συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε το πρόβλημα δρομολόγησης ενός ομοιογενούς στόλου πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων με ταυτόχρονη παραλαβή και παράδοση εμπορευμάτων στα λιμάνια και καθορισμό χρονικών περιορισμών, υπό τη θεώρηση όμως στοχαστικών χρόνων διαδρομής. Ως πεδίο εφαρμογής του στοχαστικού προβλήματος ορίστηκε ένα δίκτυο νησιών του Αιγαίου πελάγους, το οποίο τροφοδοτείται και τροφοδοτεί τον εμπορευματικό λιμένα του Πειραιά, ο οποίος επέχει και θέση του κεντρικού κόμβου στο δίκτυο. Το πρόβλημα μοντελοποιήθηκε σύμφωνα με την τεχνική προγραμματισμού των μεταβαλλόμενων περιορισμών. Στο πλαίσιο επίλυσης του, εντάχθηκε ο προσεγγιστικός προσδιορισμός της πιθανοτικής κατανομής των χρόνων διαδρομής μεταξύ των λιμένων του δικτύου εκτιμώντας την επίδραση του ανέμου στην απόδοση του πλοίου. Παράλληλα, διαμορφώθηκε γενετικός αλγόριθμος για την υλοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών του προβλήματος. Η εκτέλεση του αλγορίθμου, με εφαρμογή των πραγματικών δεδομένων, οδηγεί στο σχηματισμό του βέλτιστου συνόλου διαδρομών και στον καθορισμό του απαιτούμενου μεγέθους στόλου.

Από τη διαδικασία προσδιορισμού και ποσοτικοποίησης της επίδρασης του ανέμου στην επίδοση του πλοίου και κατ'έκταση στο συνολικό χρόνο του κάθε δρομολογίου διαμορφώνεται μία διάσταση σύγκρισης μεταξύ των χρόνων ταξιδιού, που προκύπτουν από την αντίστοιχη θεωρούμενη προσέγγιση. Η θεώρηση της στοχαστικότητας των χρόνων διαδρομής, με την παραδοχή του 90% της πιθανοτικής κατανομής, οδηγεί σε ποσοστιαία

αύξηση των χρόνων σε σχέση με τους αντίστοιχους ντετερμινιστικούς που κυμαίνεται από 4,5% έως 12%. Αντίστοιχα, η θεώρηση του 95% της πιθανοτικής κατανομής προκαλεί μια επιπρόσθετη αύξηση, της τάξης του 8% μεσοσταθμικά.

Κύριο απότοκο της υλοποίησης του αλγορίθμου αποτελεί η γεωγραφική χάραξη των διαδρομών που θα μπορούσαν να εξυπηρετήσουν σε ικανοποιητικό βαθμό τις νησιωτικές αγορές. Η εξαγωγή της προτεινόμενης δρομολόγησης αποβλέπει στη μείωση του εύρους της χρονικής διακύμανσης, η οποία είναι στενά συνδεδεμένη με τη φύση της θαλάσσιας μεταφοράς, καθώς και στην κατά το δυνατό εκτίμηση των ενδεχόμενων χρονικών καθυστερήσεων. Βάσει των αποτελεσμάτων της επίλυσης, ένα σύνολο 4 δρομολογίων (6-8 λιμένων το κάθε δρομολόγιο) που πραγματοποιούνται από πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων χωρητικότητας 150 μικρών ε/κ, μπορεί να αποτελέσει σε εβδομαδιαία βάση το κυριότερο δίκτυο εμπορικής μεταφοράς στο Αιγαίο πέλαγος. Η αναμενόμενη μέση υπέρβαση του μέγιστου χρόνου διαδρομής από την εφαρμογή της προτεινόμενης δρομολόγησης ανέρχεται στις 5,4 ώρες/διαδρομή, η οποία δεν μπορεί να αμεληθεί αλλά αξιολογείται ως ανεκτή, στο πλαίσιο λειτουργίας των ναυτιλιακών μεταφορών. Ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου κυμαίνεται μεταξύ 7 και 20 λεπτών, χρόνος αφενός κατάλληλος για τη βελτιστοποίηση του συγκεκριμένου προβλήματος μέσω επαναληπτικών δοκιμών, αφετέρου για μεγαλύτερης κλίμακας προβλήματα κρίνεται σημαντικός. Η διερεύνηση διαφορετικών σεναρίων, όπου μεταβάλλονται βασικοί παράμετροι του προβλήματος οδήγησε σε συμπεράσματα σχετικά με την εμβέλεια εφαρμογής και την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου. Η εμβέλεια εφαρμογής του διαπιστώθηκε από την απόκριση του αλγορίθμου κατά την επιλογή ενός εύρους τιμών για τις εκάστοτε παραμέτρους. Ως εκ τούτου, προέκυψαν χρήσιμα εξαγομένα, που συνοψίζονται στα εξής:

- ❖ Η επέκταση του μέγιστου επιτρεπόμενου χρόνου διαδρομής οδηγεί σε βαθμιαία μείωση των αναμενόμενων καθυστερήσεων.
- ❖ Η χρήση πλοίων μικρότερης χωρητικότητας συντελεί στην αύξηση των απαιτούμενων διαδρομών, στην αύξηση του απαιτούμενου αριθμού πλοίων αλλά και στην πλήρη εξάλειψη των καθυστερήσεων.

- ❖ Ένας πιο αυστηρός καθορισμός του επιπέδου εμπιστοσύνης για τον καθορισμό των χρόνων διαδρομής προκαλεί μεταβολή στο συνολικό χρόνο της δρομολόγησης (χρόνοι μετάβασης και εξυπηρέτησης) και αύξηση της αναμενόμενης καθυστέρησης.
- ❖ Το ύψος της παραμέτρου «ποινής», που επιβάλλεται σε περίπτωση καθυστερημένης άφιξης του πλοίου επιδρά στο μέγεθος των αναμενόμενων καθυστερήσεων, με ένα πιο «σφιχτό» πλαίσιο λειτουργίας να συμπιέζει τη διάρκειά τους.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω και κυρίως από την ανάλυση των εναλλακτικών σεναρίων που μελετήθηκαν, η τάση των αποτελεσμάτων στις εκάστοτε μεταβολές των παραμέτρων παραμένει σταθερή και σύμφωνη με τις βασικές παραδοχές του προβλήματος. Βέβαια, δε μπορεί να αμεληθεί η συμβολή της τυχαιότητας, η οποία ως ένα βαθμό είναι συνδεδεμένη με τη φύση του γενετικού αλγορίθμου. Κατά αυτόν τον τρόπο, ο αλγόριθμος αναδεικνύεται σε ένα εργαλείο δρομολόγησης, ανθεκτικό στις αλλεπάλληλες αλλαγές που εμφανίζονται κατά τις πραγματικές συνθήκες τέλεσης της ναυτιλιακής μεταφοράς. Το εργαλείο αυτό, με υπόβαθρο το προηγούμενο ερευνητικό έργο των Sambracos et al. (2004) και των Karlaftis et al. (2009), παρέχει μία προσεγγιστική διαδικασία παραγωγής διαδρομών που εκτός των περιορισμών που τέθηκαν από την υπάρχουσα γνώση, επεκτείνει την εφαρμογή της δρομολόγησης ενσωματώνοντας τις χρονικές διακυμάνσεις που πιθανοτικά προκύπτουν από τους μεταβλητούς χρόνους διαδρομής. Κατά συνέπεια, ο αλγόριθμος αυτός δεδομένης της λειτουργικότητας του, της απλότητας στη χρήση του και της εύλογης ευρωστίας του στις μεταβολές μπορεί να αποτελέσει ένα ακόμα μέσο στη διάθεση των ενδιαφερόμενων με τη ναυτιλία μερών κατά τη χάραξη του δικτύου εμπορευματικών ροών στο Αιγαίο. Παράλληλα, η ενσωμάτωση της στοχαστικότητας συνεπικουρεί στη χρήση του ως μέρος ενός συστήματος λήψης αποφάσεων που αποσκοπεί στον περιορισμό του μεταφορικού κόστους, όχι μόνο στο Αιγαίο αλλά και σε οποιαδήποτε ναυτιλιακή αγορά αποτελείται από έναν αριθμό λιμένων που συνδέονται ακτινικά με έναν κεντρικό κόμβο.

7.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Το πρόβλημα που διερευνήθηκε, βασίστηκε σε ορισμένες παραδοχές που καθορίζουν το περίγραμμα των πραγματικών συνθηκών που λαμβάνονται υπόψη κατά τη δρομολόγηση.

Όμως, οι παράγοντες που υπεισέρχονται κατά τη διενέργεια των θαλάσσιων μεταφορών είναι πολυάριθμοι και συνιστούν ένα πολυσύνθετο πεδίο που δυσχεραίνει την αποτύπωσή τους στο πρότυπο ενός προβλήματος. Στην κατεύθυνση αυτή, διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα:

- ❖ Ως προς την εκτίμηση των χρόνων διαδρομής, προτείνεται σε επόμενο στάδιο η ακριβέστερη εκτίμηση του ανεμολογικού προφίλ της κάθε υπο-περιοχής του Αιγαίου, με χρήση αναλυτικών χρονοσειρών και μετρήσεων της ταχύτητας του ανέμου. Πρόκειται για μια ιδιαίτερα χρονοβόρα και εκτεταμένη διαδικασία, δεδομένων του όγκου των στοιχείων και του υψηλού βαθμού λεπτομέρειας που απαιτούνται. Η στατιστική επεξεργασία των στοιχείων αυτών παρέχει μεγαλύτερης ακρίβειας κατανομές πυκνότητας-πιθανότητας καθώς και τις κατανομές πιθανότητας εμφάνισης της κάθε διεύθυνσης του ανέμου.
- ❖ Περαιτέρω διερεύνηση μπορεί να πραγματοποιηθεί στην κατεύθυνση του προσδιορισμού της επίδρασης των καιρικών συνθηκών στην απόδοση του πλοίου. Στην παρούσα εργασία η εκτίμηση της επίδρασης βασίστηκε σε μία προσεγγιστική μαθηματική σχέση που χρησιμοποιείται κυρίως για πρακτικούς λόγους. Σε εξέλιξη αυτής της μεθοδολογίας, είναι δυνατή η ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς του πλοίου αναφοράς σε κυματισμούς, ώστε να καθοριστεί επακριβώς η πρόσθετη αντίσταση που δημιουργείται στο πλοίο λόγω των κυματισμών και ακολούθως η αναμενόμενη απομείωση της ταχύτητας. Παράλληλα, σε επόμενο ερευνητικό στάδιο απαραίτητη είναι και η ενσωμάτωση της εκούσιας απώλειας ταχύτητας του πλοίου, που παρουσιάζει ιδιαίτερη δυσκολία στον εκ των προτέρων καθορισμό της.
- ❖ Σε σχέση με τις παραδοχές του μοντέλου του προβλήματος, μπορεί να θεωρήθηκαν στοχαστικοί οι χρόνοι διαδρομής, αλλά οι χρόνοι εξυπηρέτησης επί του λιμένα λήφθηκαν ως ντετερμινιστικοί. Στην πραγματικότητα όμως, οι έντονες καιρικές συνθήκες και ιδιαίτερα οι υψηλής έντασης άνεμοι δυσχεραίνουν τον ομαλό ελλιμενισμό των πλοίων καθώς και το μετέπειτα απόπλου τους, ειδικότερα σε μικρά και απομακρυσμένα νησιά όπου οι λιμενικές υποδομές κρίνονται ανεπαρκείς. Παράλληλα, σε περιόδους υψηλής ζήτησης εμπορευμάτων και ιδιαίτερα στα μεγάλα και τουριστικά νησιά εμφανίζονται συχνά συνθήκες αιχμής όσον αφορά στη χρήση των λιμενικών εγκαταστάσεων, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται ουρές αναμονής και συνεπαγόμενες καθυστερήσεις. Απότοκο όλων των παραπάνω αποτελεί η

αναγκαιότητα στοχαστικής θεώρησης και των χρόνων φορτοεκφόρτωσης, οι οποίοι εξαρτώνται τόσο από τις καιρικές συνθήκες όσο και από την αναμενόμενη εμπορευματική κίνηση που εμφανίζει ο λιμένας. Τέλος, επειδή ο υπολογισμός του χρόνου εξυπηρέτησης θεμελιώθηκε σε εμπειρική μέθοδο, σε επόμενο στάδιο προτείνεται ο πιο ενδεδειγμένος προσδιορισμός του χρόνου φορτοεκφόρτωσης, λαμβάνοντας υπόψη την υποδομή και τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία (μηχανήματα, εξοπλισμός) του κάθε λιμένα του δικτύου.

Οι παραπάνω προτάσεις που διατυπώθηκαν είναι δυνατό, σε επίπεδο λειτουργικού σχεδιασμού, να βελτιώσουν άμεσα τη μεθοδολογία με την οποία προτυποποιείται η ζητούμενη δρομολόγηση και να διευρύνουν το πεδίο εφαρμογής του προβλήματος. Σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα, ο στοχαστικός χαρακτήρας του προβλήματος δύναται να παγιωθεί με την εισαγωγή όλων και περισσότερων στοχαστικής φύσης δεδομένων, που στις μέχρι τώρα σχετικές έρευνες έχουν ληφθεί ως σταθερά. Τέτοια δεδομένα όπως η στοχαστική ζήτηση ή η προσφορά, σε δεύτερο βαθμό, μπορεί μεν να αναβαθμίζουν την υπολογιστική δυσκολία του προβλήματος, αποτυπώνουν δε τους κυριότερους περιορισμούς αλλά και τις βασικότερες πρακτικές που εφαρμόζονται στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, στον καθορισμό του μεταφορικού κόστους και εν γένει στην οργάνωση της ναυτιλιακής μεταφοράς.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Agarwal, R., Ergun, Öz. (2008). Ship Scheduling and Network Design for Cargo Routing in Liner Shipping. *Transportation Science Vol. 42*, 175-196.
- Akdağ, S. A., Bagiorgas, H. S., & Mihalakakou, G. (2010). Use of two-component Weibull mixtures in the analysis of wind speed in the Eastern Mediterranean. *Applied Energy*, *87(8)*, 2566–2573.
- Bagiorgas, H. S., Mihalakakou, G., Rehman, S., & Al-Hadhrami, L. M. . (2012). Offshore wind speed and wind power characteristics for ten locations in Aegean and Ionian Sea. *Journal of earth system science*, *121(4)*, σσ. 975-987.
- Boditch, N. (2002). The American Practical Navigator–2002 Bicentennial Edition. *National Imagery and Mapping Agency (NIMA)*.
- Bräysy, O., Dullaert, W., & Gendreau, M. (2004). Evolutionary algorithms for the vehicle routing problem with time windows. *Journal of Heuristics*, *10(6)*, 587-611.
- Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B., Ronen, D. (2007). Maritime Transportation. Στο C. Laporte, & G. Barnhart , *Handbooks in Operations Research & Management Science: Transportation, Volume 14*. Elsevier.
- Christiansen, M., Fagerholt, K., Ronen, D. (2004, February). Ship routing and Scheduling: Status and Perspectives. *Transportation Science* *38 (1)*, σσ. 1-18.
- Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B., Ronen, D. (2013). Ship routing and scheduling in the new millennium. *European Journal of Operational Research* *228*, 467–483.
- Chuang, T., Lin, Ch., Kung, J., Lin, M. (2010). Planning the route of container ships: A fuzzy genetic approach. *Expert Systems with Applications* *37*, 2948–2956.
- Cordeau, J. F., Laporte, G., & Mercier, A. (2001). A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows. *Journal of the Operational research society*, 928-936.
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management science*, *6(1)*, 80-91.
- Davis, L. (1991). *Handbook of Genetic Algorithms*. Van Nostrand Reinhold.
- Dethloff, J. (2001). Vehicle routing and reverse logistics: the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up. *OR-Spektrum*, *23(1)*, 79-96.
- Eiben, A. E., & Smith, J. E. (2003). *Introduction* (pp. 1-14). Springer Berlin Heidelberg.
- FYRIPPIS, I., AXAOPOULOS, P. J., & PANAYIOTOU, G. Wind Power Potential in Central Aegean Sea, Greece. *Proceedings of the 2nd WSEAS/IASME Int. Conf. on Renewable Energy Sources (RES'08)* (σσ. 210-215). ISSN (Vol. 5095).

- Gendreau, M., Hertz, A., Laporte, G., (1994). A tabu search heuristic for the vehicle routing problem. *Management Science* 40 (10), 1276–1290.
- Gendreau, M., Laporte, G., Potvin, J.-Y., (2002). Metaheuristics for the capacitated vrp. In: Toth, P., Vigo, D. (Eds.), *The Vehicle Routing Problem*. SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications. SIAM, Philadelphia, pp. 129–154.
- Gendreau, M., Laporte, G., Seguin, R. (1996). Stochastic vehicle routing. *European Journal of Operational Research* 88, 3-12.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. U Michigan Press.
- Imai, A., Shintani, K., Papadimitriou, S. (2009). Multi-port vs. Hub-and-Spoke port calls by containerships. *Transportation Research Part E* 45, σσ. 740-757.
- Jih, W. R., & Hsu, Y. (2004). A family competition genetic algorithm for the pickup and delivery problems with time window. *Bulletin of the College of Engineering*, 90, 121-130.
- Karlaftis, M.,Kepaptsoglou, K., Sambracos, E. (2009). Containership routing with time deadlines and simultaneous deliveries and pick-ups. *Transportation Research Part E* 45, σσ. 210-221.
- Kjeldsen, K., . (2012). *Routing and Scheduling in Liner Shipping*. Phd Thesis, Department of Economics and Business, Aarhus University.
- Kwon, Y.J. (1981). *The effect of weather, particularly short sea waves, on ship speed performance*. Ph.D Thesis, University of Newcastle upon Tyne, Department of Naval Architecture and Shipbuilding.
- Lalas, D. P., H. Tselepidaki, and G. Theoharatos. (1983). An analysis of wind power potential in Greece. *Solar Energy, Vol. 30, No. 6,,* σσ. 497-505.
- Laporte, G., Gendreau, M., Potvin, J. Y., & Semet, F. (2000). Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. *International transactions in operational research*, 7(4-5), 285-300.
- Lavagnini, A., Sempreviva, A. M., Transerici, C., Accadia, C., Casaioli, M., Mariani, S., & Speranza, A. (2006). Offshore wind climatology over the Mediterranean basin. . *Wind Energy*, 9(3),, σσ. 251-266.
- Li, X., Tian, P., & Leung, S. C. (2010). Vehicle routing problems with time windows and stochastic travel and service times: models and algorithm.*International Journal of Production Economics*, 125(1), 137-145.
- Marinakis, Y., Migdalas, A., & Pardalos, P. M. (2007). A new bilevel formulation for the vehicle routing problem and a solution method using a genetic algorithm. *Journal of Global Optimization*, 38(4), 555-580.
- Meng, Q., Wang, T. (2011). A scenario-based dynamic programming model for multi-period liner ship fleet planning. *Transportation Research Part E* 47, σσ. 401-413.

- Mole R.H. & Jameson S.R. ,1976. A sequential route-building algorithm employing a generalized savings criterion. *Operations Research Quarterly*, 27, 503-511.
- Notteboom, T. E. (2006). The time factor in liner shipping services. *Maritime Economics & Logistics*, 8(1), 19-39.
- Notteboom, T., & Rodrigue, J. P. (2008). Containerisation, box logistics and global supply chains: The integration of ports and liner shipping networks. *Maritime Economics & Logistics*, 10(1), 152-174.
- Pantazis, D.N., Stratakis, P., Karathanasis, C., Gkadolou, E., Pagounis, V., Chronis, K., Gatsiou, M., Moumouri-Fragkou, F., Tsekos, P. . (29 – 31 May, 2013). Coastal transport integrated system in the Aegean Sea Islands: Framework, methodology, data issues and preliminary results. *29th Urban Data Management Symposium*. London, United Kingdom.
- Prins, C.,. (2004). A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem. *Computers and Operations Research* 31, 1985-2002.
- Reinhardt, L., Kallehauge, B., Nørrelund, A., Olsen, A. (2007). *Network Design Models for Container Shipping*. Danish Maritime Fund.
- Saita, S.M., Youssef, H. (1999). Iterative Computer Algorithms with Applications in Engineering. Στο *Solving Combinatorial Optimization Problems, chapter 3*. IEEE Computer Society.
- Sambracos, E. (2000). Exploring operational problems of the goods supply chain in the Greek islands: Towards a reengineering of the system. *Repositioning Logistics*. In *16th International Logistics Congress, Versailles, October*.
- Sambracos, E., Paravantis, J.A., Tarantilis, C.D., Kiranoudis C.T. (2004). Dispatching of small containers via coastal freight liners: The case of the Aegean Sea. *European Journal of Operational Research* 152, σσ. 365-381.
- Shintani, K., Imai, A., Nishimura, E., Papadimitriou, E. (2007). The container shipping network design problem. *Transportation Research Part E* 43, 39-59.
- Sigurd, M., Ulstein, N., Nygreen, B., Ryan, D. (2005). Ship scheduling with recurring visits and visit separation requirements. Στο G. D. Desaulniers, *Column Generation* (σσ. 225-245). US: Springer.
- Thangiah, S. R. (1993). *Vehicle routing with time windows using genetic algorithms*. Artificial Intelligence Lab., Slippery Rock Univ.
- Townsin, R. L., & Kwon, Y. J. . (1983). *Approximate formulae for the speed loss due to added resistance in wind and waves*. British Maritime Technology.
- Vernimmen, B., Dullaert, W., & Engelen, S. (2007). Schedule unreliability in liner shipping: Origins and consequences for the hinterland supply chain. *Maritime Economics & Logistics*, 9(3), 193-213

- Vogiatzis, N., Kotti, K., Spanomitsios, S., & Stoukides, M. . (2004). Analysis of wind potential and characteristics in North Aegean, Greece. *Renewable energy*, 29(7), σσ. 1193-1208.
- Wang, S., & Meng, Q. (2012b). Liner ship route schedule design with sea contingency time and port time uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(5), 615-633.
- Wark P. & Holt J. (1994). *A repeated matching heuristic for the vehicle routing problem. Journal of the Operations Research Society*, 45, 1156-1167. Xu J. & Kelly J.P. (1996). *A new network*
- Wiley, V.D. (2000). *The Symmetric Group Class User's Manual for Partitioning and Ordering Problems*. The University of Texas at Austin, USA.
- Xiangyong, Li, Peng, Tian, Stephen C.H. Leung. (2010). Vehicle routing problems with time windows and stochastic travel and service times: Models and algorithm. *Int. J. Production Economics* 125, σσ. 137-145.
- Zafirakis, D., Gavrilopoulou, E., Kavadias, K. A., & Kaldellis, J. K. *THE NEED FOR THE DEVELOPMENT OF A NEW READJUSTED WEIBULL DISTRIBUTION FOR INCREASED RELIABILITY OF ENERGY YIELD ESTIMATION*.
- Zhang, T., Chaovalitwongse, W.A., Zhang, Y. (2012). Scatter search for the stochastic travel-time vehicle routing problem with simultaneous pick-ups and deliveries. *Computers & Operations Research* 39, σσ. 2277-2290.
- Αθανασούλη, Γ. Α. και Σκαρσουλή ΕΚ, 1992. *Άτλας Ανέμου και Κύματος, βορειοανατολικής Μεσογείου θαλάσσης. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών*.
- Επιστημονική Επιτροπή Ινστιτούτου Τοπικής Αυτοδιοίκησης. (2006). Το Πρόβλημα των Μεταφορών στα Νησιά και ο ρόλος της τοπικής αυτοδιοίκησης. *Ειδικό θεματικό συνέδριο της ΚΕΔΚΕ για τις μεταφορές στα νησιά*. Σύρος.
- Καλδέλλης, Ι. (2005). Επεξεργασία και Αξιολόγηση του Αιολικού Δυναμικού. Στο Ι. Καλδέλλης, *Διαχείριση της αιολικής ενέργειας*. Εκδόσεις Σταμούλη.
- Μακρόπουλος, Χρ., Ευστρατιάδης, Αν. (2011). *Γενετικοί Αλγόριθμοι, Σημειώσεις Βελτιστοποίησης Συστημάτων και Υδροπληροφορικής*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Περδικάρη, Θ. (2006). *ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΑΧΥΠΛΟΟΥ ΣΚΑΦΟΥΣ ΣΕ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ*. Τεχνικά Χρονικά ΤΕΕ.
- Ραμαντάνης., Ηλ. (2009). *Στοιχεία για την επίδραση ναυτιλίας και κλιματικών αλλαγών*. Διπλωματική εργασία, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών.
- Ρούσσοι, Γ. (2007). *ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΑΧΥΠΛΟΩΝ ΣΚΑΦΩΝ ΔΙΠΛΗΣ ΑΚΜΗΣ ΣΕ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ*. Διπλωματική εργασία, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Τζώρτζης, Ι. (2011). *Εκτίμηση αιολικού δυναμικού βασισμένη στην κατανομή Weibull*. Διπλωματική εργασία, Τμήμα Φυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Χάλκος, Δ. (2008). *Επιχειρησιακή Έρευνα στον τομέα της Ναυτιλίας: Υποστήριξη αποφάσεων δρομολόγησης πλοίων για τη μεταφορά φορτίων*. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

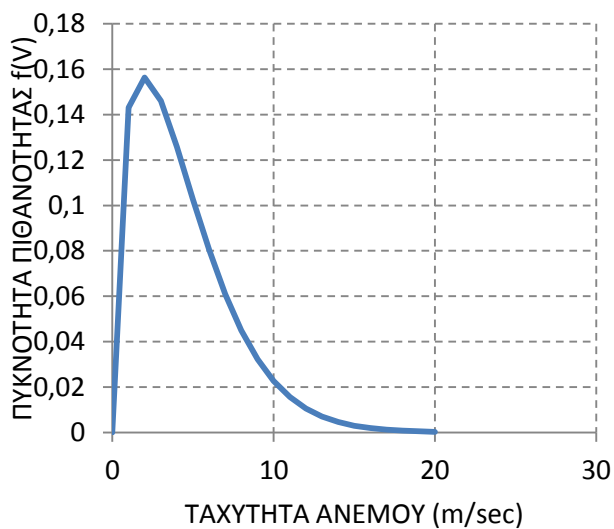
Χρυσόχου, Ε., Ζηλιασκόπουλος, Αθ. (2012). Το στοχαστικό πρόβλημα δρομολόγησης εμπορευματικών μεταφορών. *23ο Εθνικό Συνέδριο της Ελληνικής Εταιρίας Επιχειρησιακών Ερευνών*, (σσ. 179-185). Αθήνα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

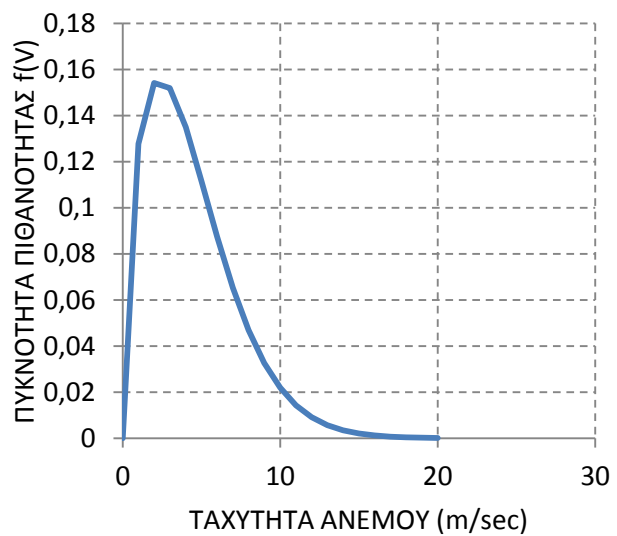
Α. Διαγράμματα πυκνότητας-πιθανότητας ταχύτητας ανέμου

Παρακάτω παρουσιάζονται οι κατανομές πυκνότητας-πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου, για κάθε ομοιογενή ανεμολογική ζώνη, όπως αυτές προκύπτουν από το χάρτη ανεμολογικών παραμέτρων του Αιγαίου πελάγους.

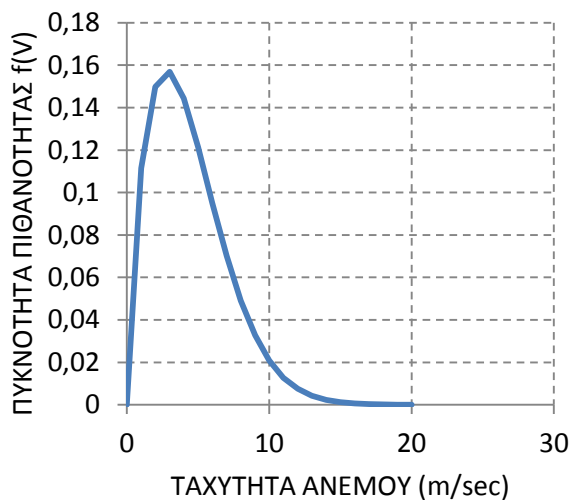
1.1



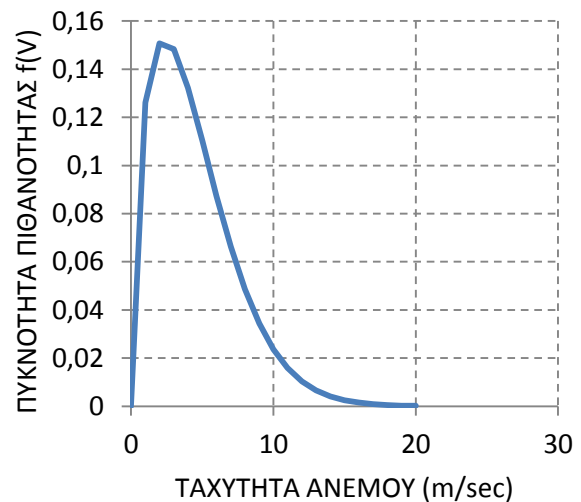
2.1



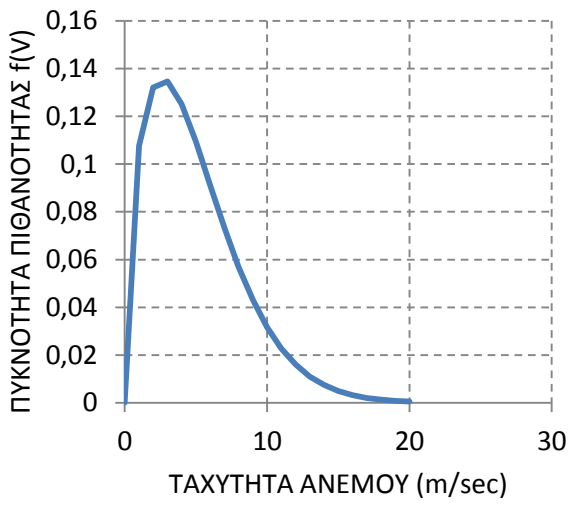
3.1



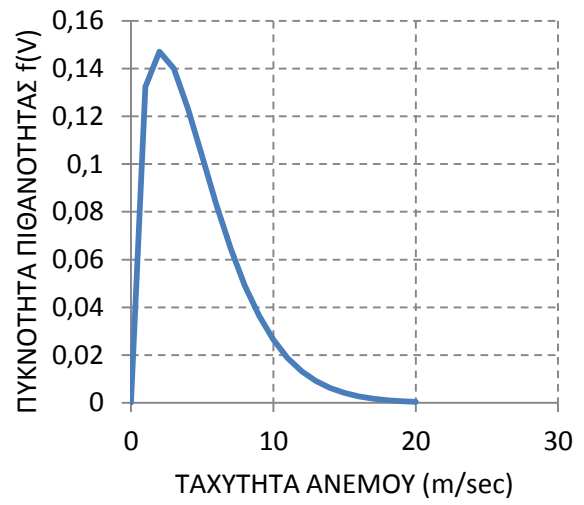
4.1



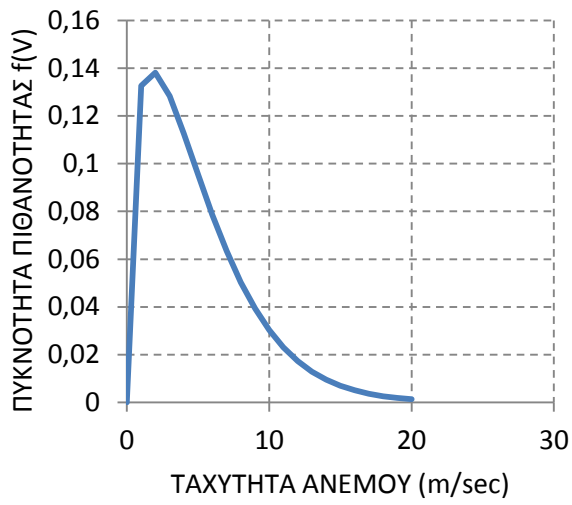
5.1



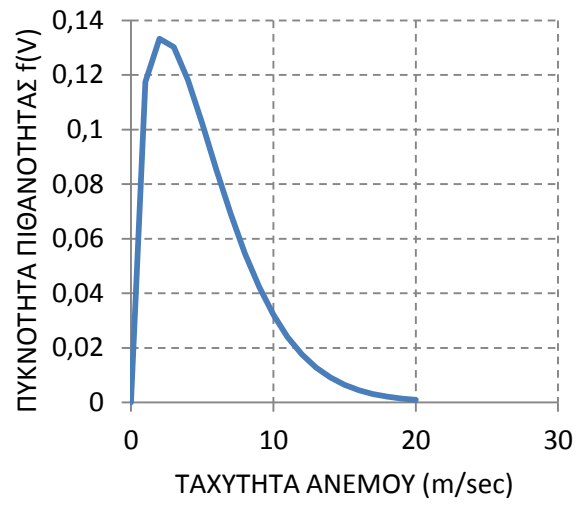
6.1



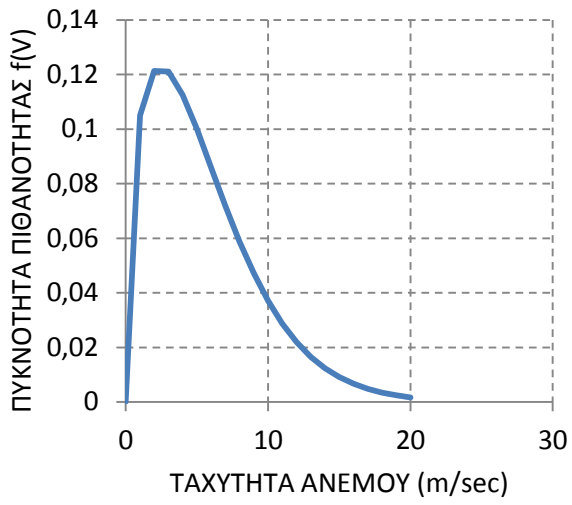
1.2



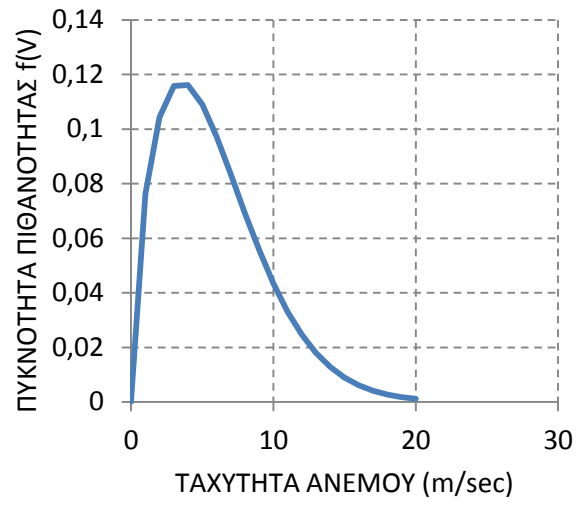
2.2



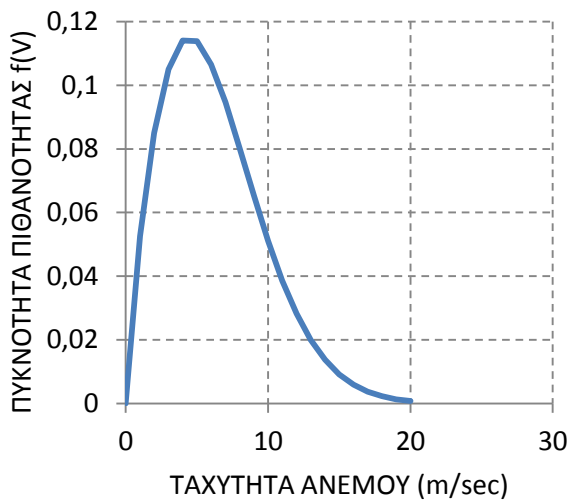
3.2



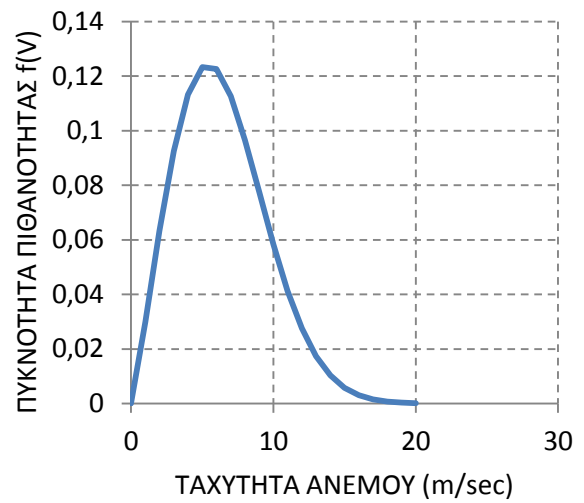
4.2



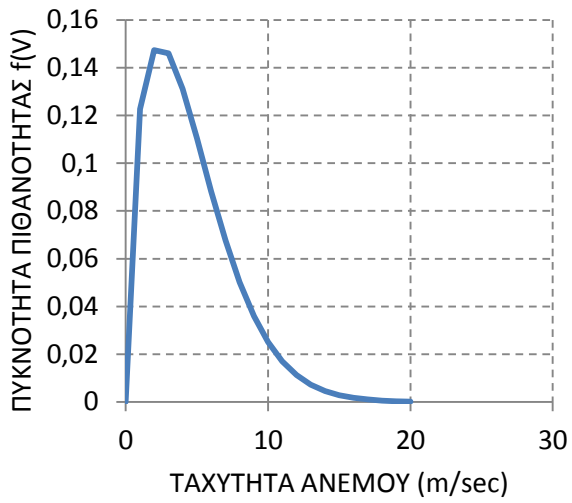
5.2



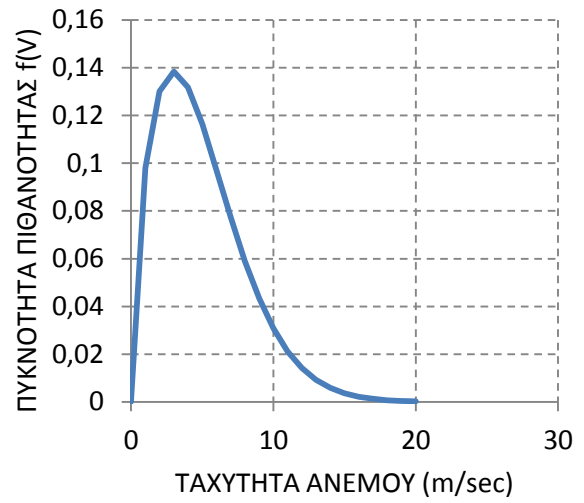
6.2



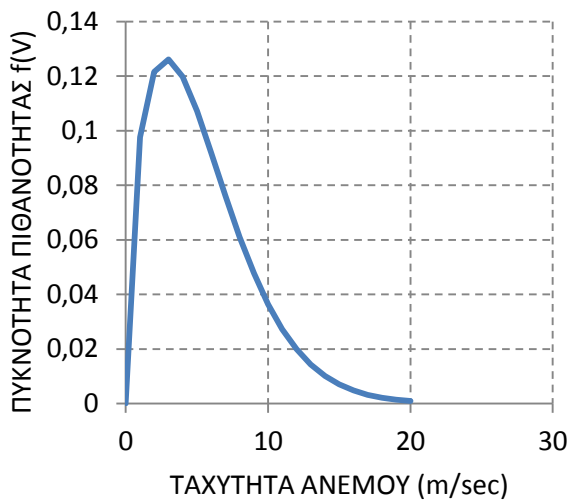
1.3



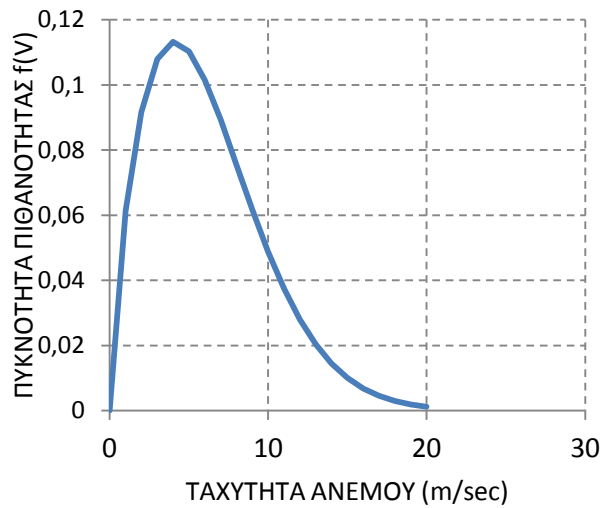
2.3



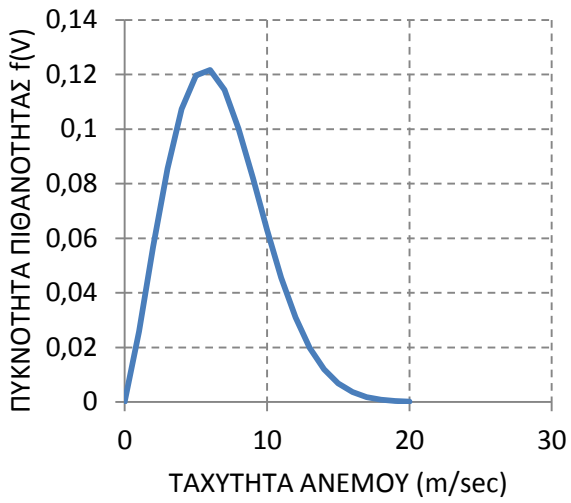
3.3



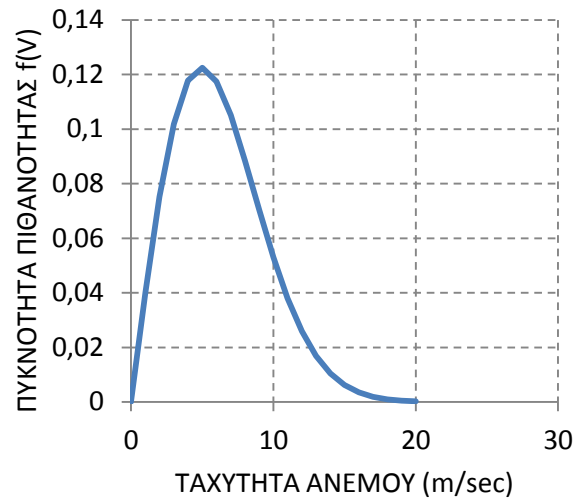
4.3



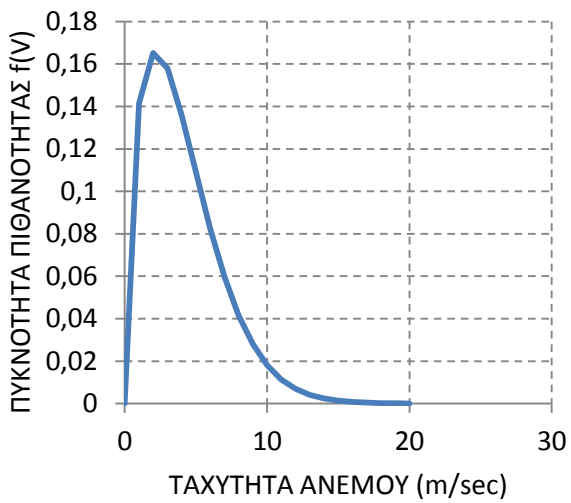
5.3



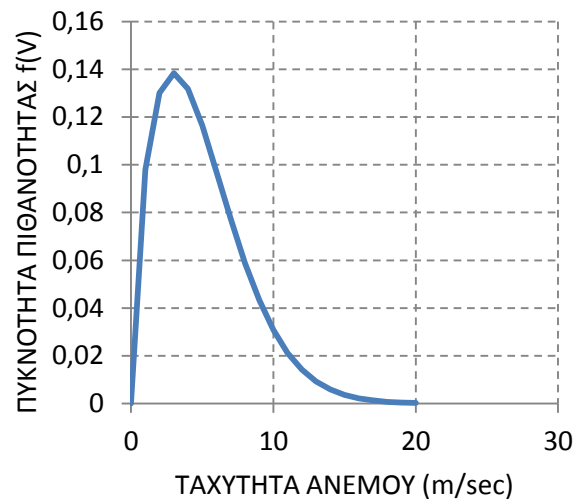
6.3



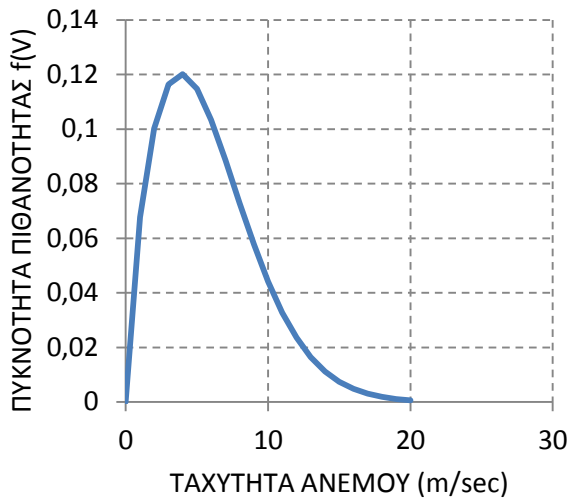
1.4



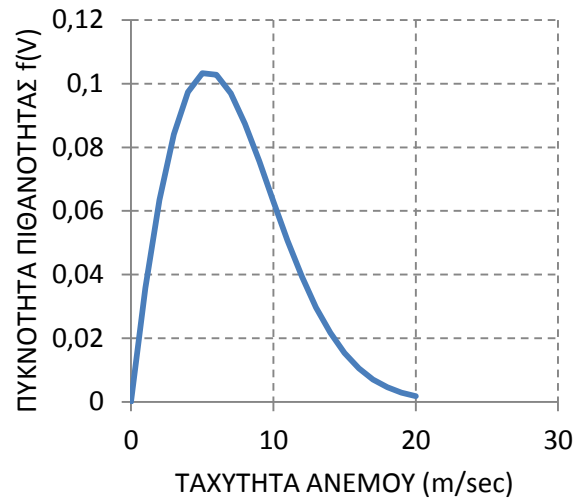
2.4



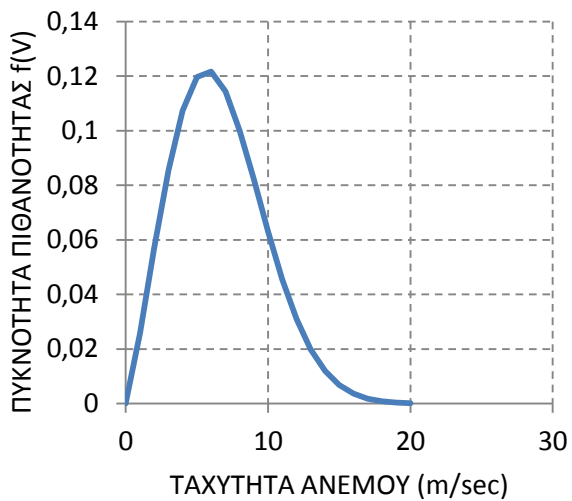
3.4



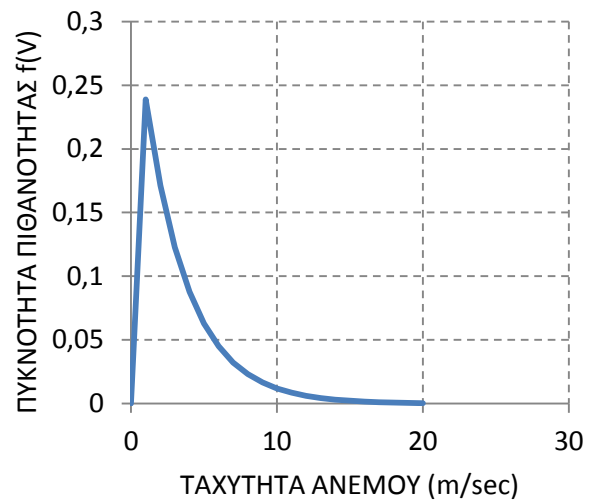
4.4



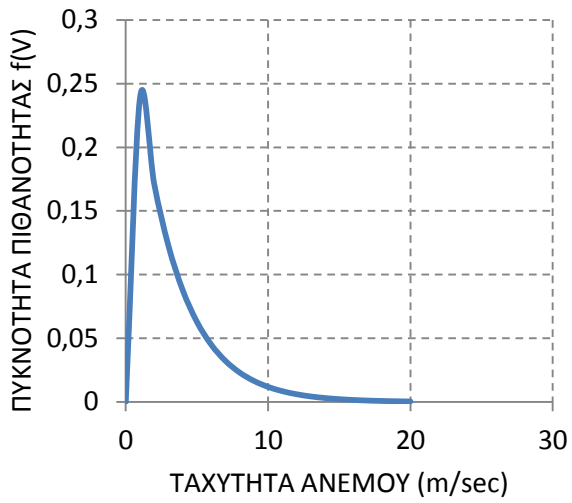
5.4



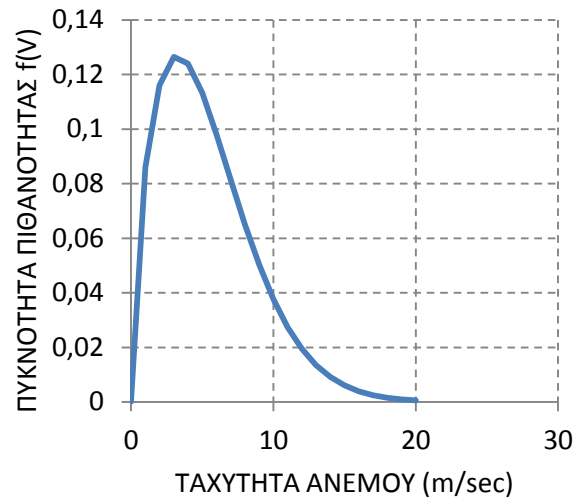
1.5



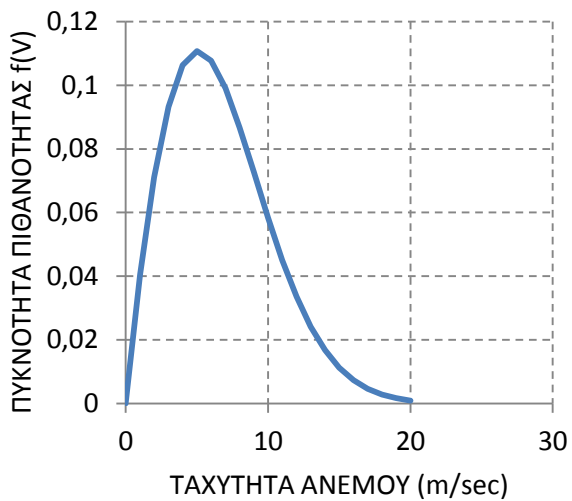
2.5



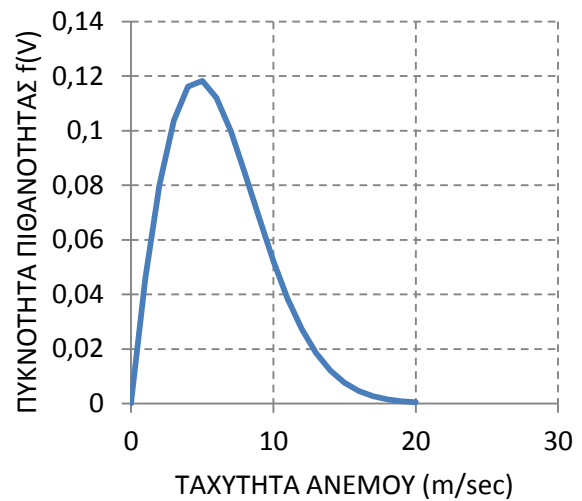
3.5



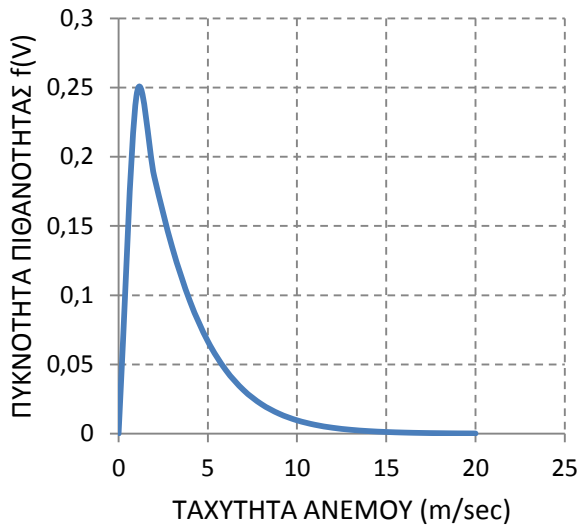
4.5



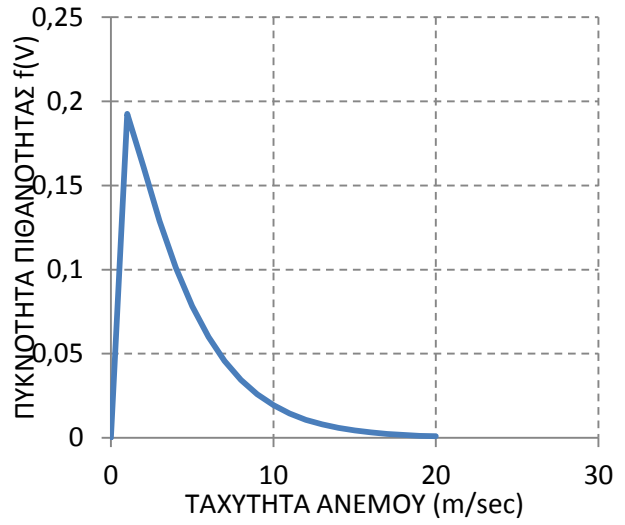
5.5



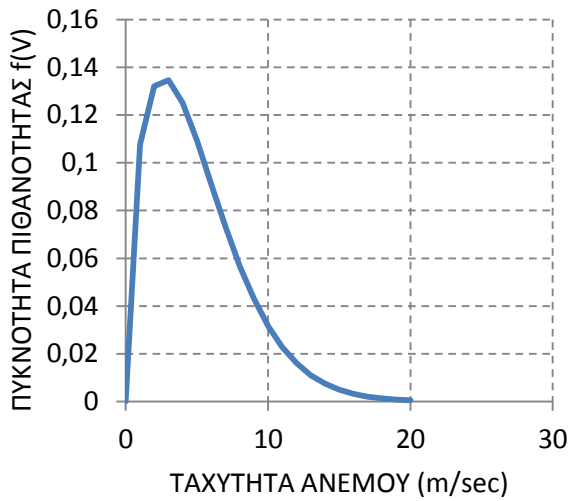
1.6



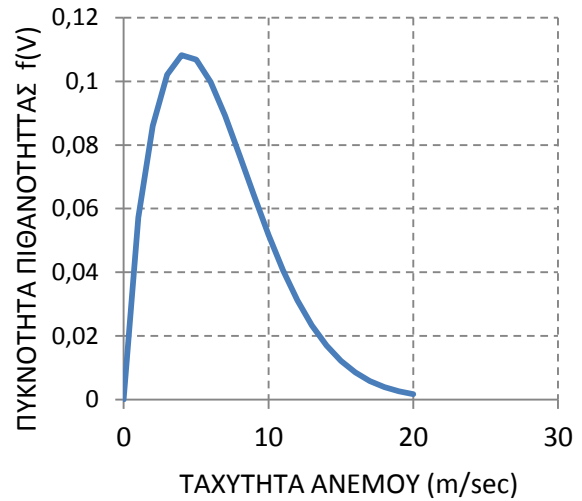
2.6



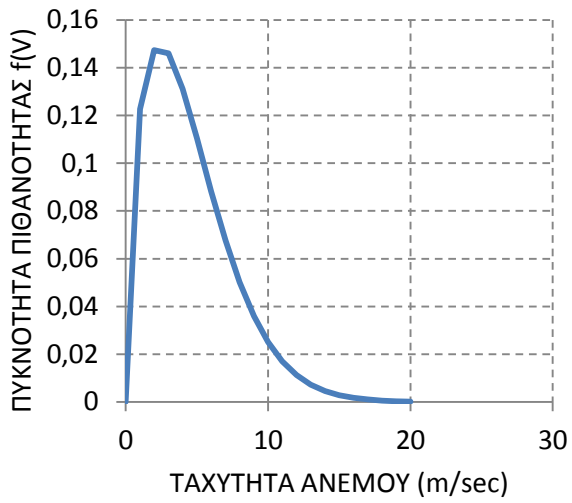
3.6



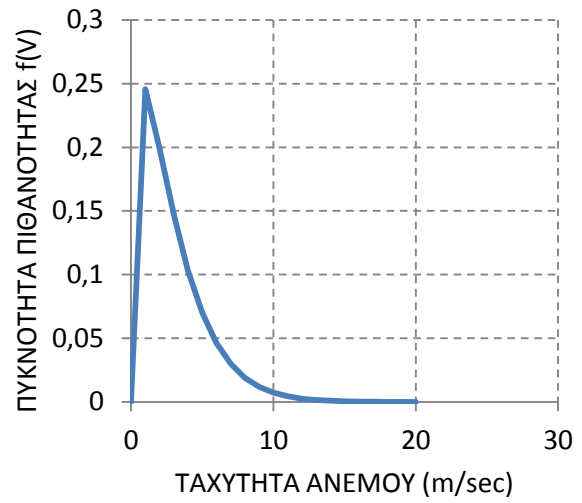
4.6



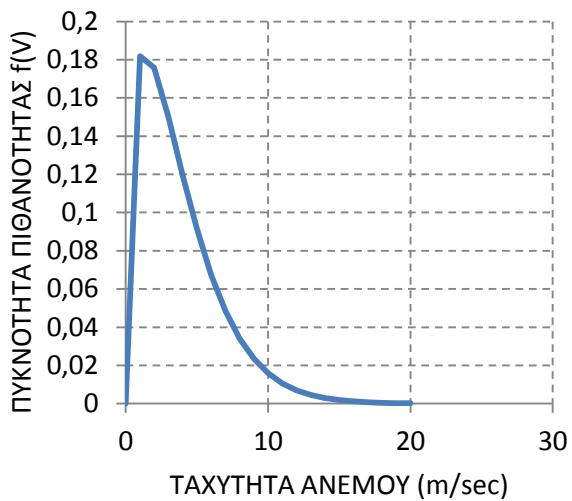
5.6



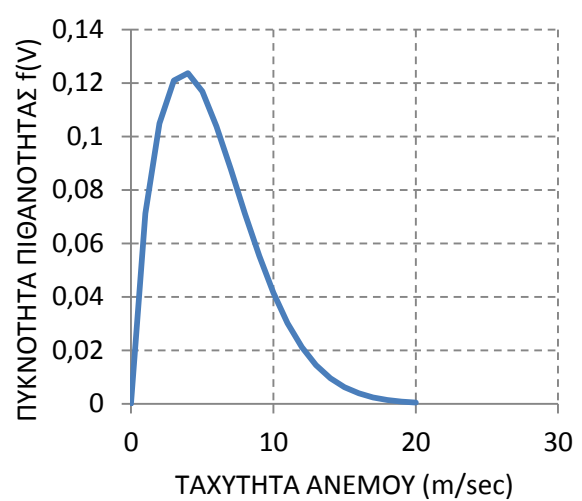
1.7



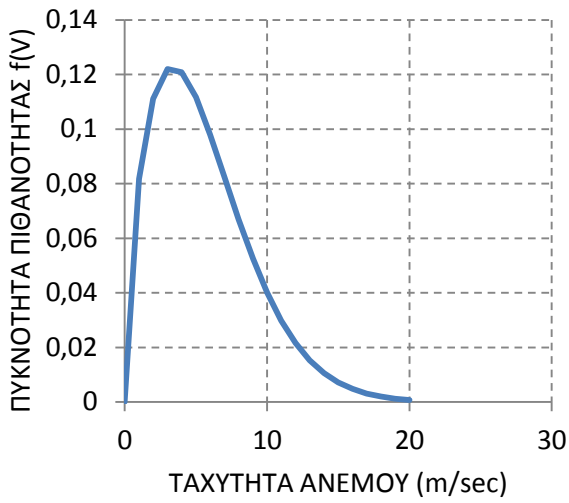
2.7



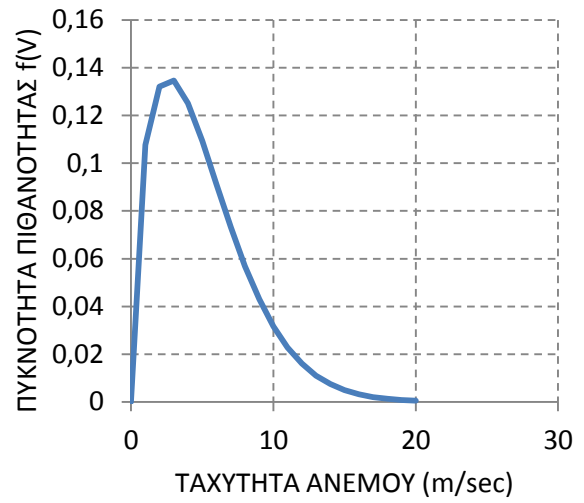
3.7



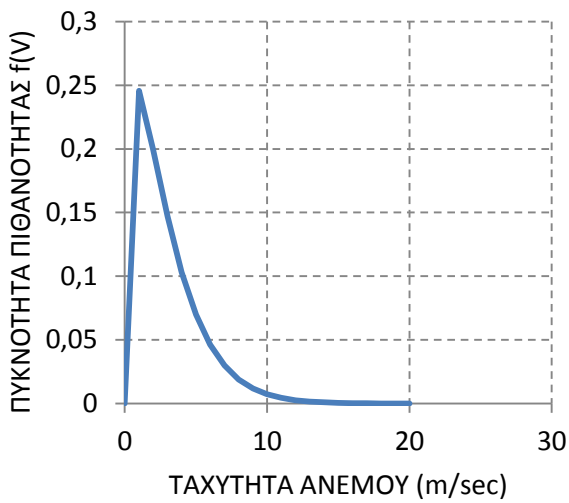
4.7



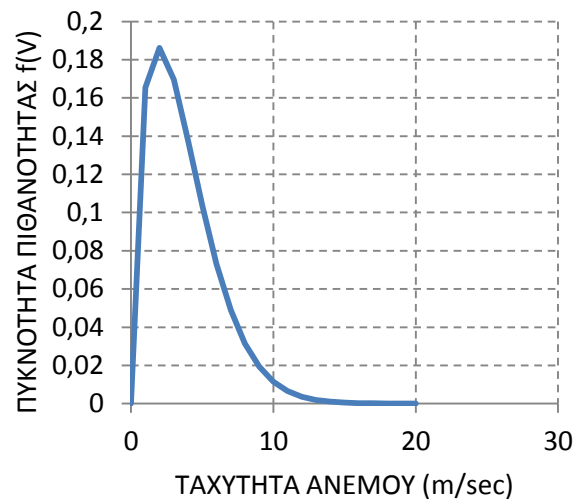
5.7



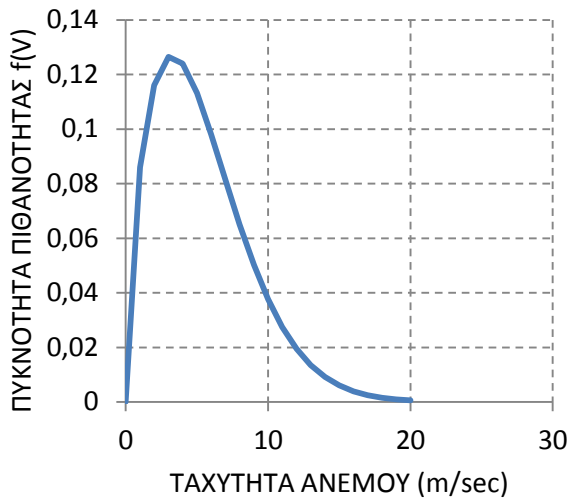
1.8



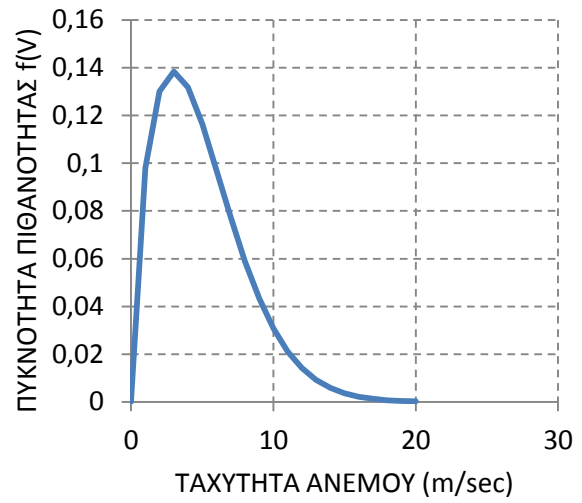
2.8



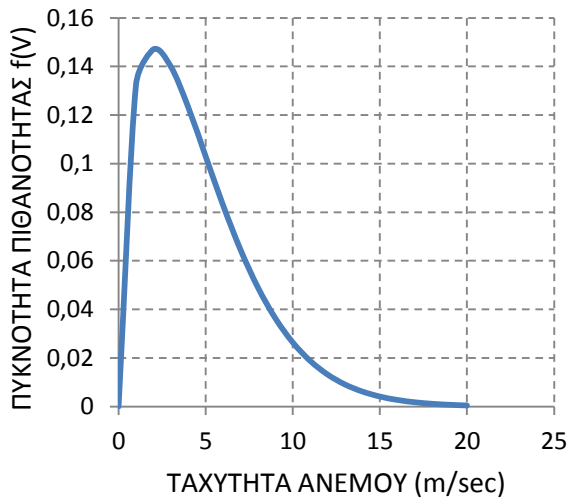
3.8



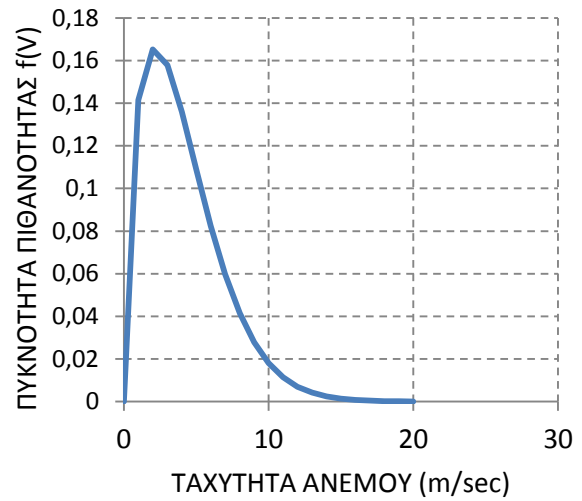
4.8



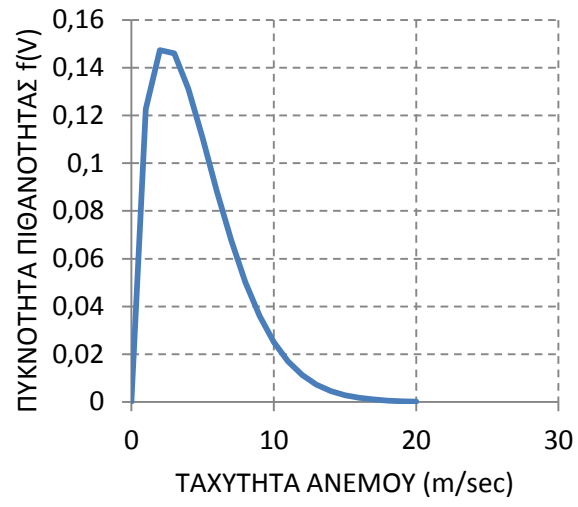
5.8



3.9



4.9



Β. Συγκεντρωτικά στοιχεία υπολογισμού χρόνων διαδρομής από το κεντρικό λιμάνι

ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΡΕΘΥΜΝΟ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	13,17
	1,00	1,13	0,10	0,10	12,00	0,79	11,91	13,27
	2,00	1,79	0,13	0,24	12,00	1,25	11,85	13,33
	3,00	2,34	0,14	0,37	12,00	1,66	11,80	13,39
	4,00	2,84	0,13	0,50	12,00	2,04	11,75	13,44
	5,00	3,29	0,11	0,62	12,00	2,45	11,71	13,50
	6,00	3,72	0,09	0,71	12,00	2,92	11,65	13,56
	7,00	4,12	0,07	0,79	12,00	3,50	11,58	13,64
	8,00	4,51	0,06	0,84	12,00	4,25	11,49	13,75
	9,00	4,88	0,04	0,88	12,00	5,24	11,37	13,89
	10,00	5,23	0,03	0,91	12,00	6,54	11,22	14,09
	11,00	5,57	0,02	0,93	12,00	8,25	11,01	14,35
	12,00	5,91	0,01	0,95	12,00	10,48	10,74	14,71
	13,00	6,23	0,01	0,96	12,00	13,33	10,40	15,19
	14,00	6,55	0,01	0,97	12,00	16,95	9,97	15,85
	15,00	6,85	0,00	0,97	12,00	21,48	9,42	16,77
	16,00	7,15	0,00	0,97	12,00	27,08	8,75	18,06
	17,00	7,45	0,00	0,98	12,00	33,91	7,93	19,92
18,00	7,74	0,00	0,98	12,00	42,18	6,94	22,77	

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΗΡΑΚΛΕΙΟ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	14,50
	1,00	1,13	0,10	0,10	12,00	0,79	11,91	14,62
	2,00	1,79	0,13	0,24	12,00	1,25	11,85	14,68
	3,00	2,34	0,14	0,37	12,00	1,66	11,80	14,74
	4,00	2,84	0,13	0,50	12,00	2,04	11,75	14,80
	5,00	3,29	0,11	0,62	12,00	2,45	11,71	14,86
	6,00	3,72	0,09	0,71	12,00	2,92	11,65	14,94
	7,00	4,12	0,07	0,79	12,00	3,50	11,58	15,03
	8,00	4,51	0,06	0,84	12,00	4,25	11,49	15,14
	9,00	4,88	0,04	0,88	12,00	5,24	11,37	15,30
	10,00	5,23	0,03	0,91	12,00	6,54	11,22	15,51
	11,00	5,57	0,02	0,93	12,00	8,25	11,01	15,80
	12,00	5,91	0,01	0,95	12,00	10,48	10,74	16,20
	13,00	6,23	0,01	0,96	12,00	13,33	10,40	16,73
	14,00	6,55	0,01	0,97	12,00	16,95	9,97	17,46
	15,00	6,85	0,00	0,97	12,00	21,48	9,42	18,47
	16,00	7,15	0,00	0,97	12,00	27,08	8,75	19,88
17,00	7,45	0,00	0,98	12,00	33,91	7,93	21,94	
18,00	7,74	0,00	0,98	12,00	42,18	6,94	25,08	

ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΚΥΘΗΡΑ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	10,33
	1,00	1,13	0,10	0,10	12,00	0,79	11,91	10,42
	2,00	1,79	0,12	0,22	12,00	1,25	11,85	10,46
	3,00	2,34	0,13	0,35	12,00	1,66	11,80	10,51
	4,00	2,84	0,12	0,47	12,00	2,04	11,75	10,55
	5,00	3,29	0,11	0,57	12,00	2,45	11,71	10,59
	6,00	3,72	0,09	0,67	12,00	2,92	11,65	10,64
	7,00	4,12	0,08	0,74	12,00	3,50	11,58	10,71
	8,00	4,51	0,06	0,80	12,00	4,25	11,49	10,79
	9,00	4,88	0,05	0,85	12,00	5,24	11,37	10,90
	10,00	5,23	0,03	0,88	12,00	6,54	11,22	11,06
	11,00	5,57	0,03	0,91	12,00	8,25	11,01	11,26
	12,00	5,91	0,02	0,93	12,00	10,48	10,74	11,54
	13,00	6,23	0,01	0,94	12,00	13,33	10,40	11,92
	14,00	6,55	0,01	0,95	12,00	16,95	9,97	12,44
	15,00	6,85	0,01	0,95	12,00	21,48	9,42	13,16
	16,00	7,15	0,00	0,96	12,00	27,08	8,75	14,17
17,00	7,45	0,00	0,96	12,00	33,91	7,93	15,64	
18,00	7,74	0,00	0,96	12,00	42,18	6,94	17,87	

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΜΗΛΟΣ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	8,08
	1,00	1,13	0,10	0,10	12,00	0,79	11,91	8,15
	2,00	1,79	0,13	0,22	12,00	1,25	11,85	8,19
	3,00	2,34	0,13	0,36	12,00	1,66	11,80	8,22
	4,00	2,84	0,13	0,48	12,00	2,04	11,75	8,25
	5,00	3,29	0,11	0,59	12,00	2,45	11,71	8,29
	6,00	3,72	0,09	0,69	12,00	2,92	11,65	8,33
	7,00	4,12	0,08	0,77	12,00	3,50	11,58	8,38
	8,00	4,51	0,06	0,82	12,00	4,25	11,49	8,44
	9,00	4,88	0,04	0,87	12,00	5,24	11,37	8,53
	10,00	5,23	0,03	0,90	12,00	6,54	11,22	8,65
	11,00	5,57	0,02	0,92	12,00	8,25	11,01	8,81
	12,00	5,91	0,02	0,94	12,00	10,48	10,74	9,03
	13,00	6,23	0,01	0,95	12,00	13,33	10,40	9,33
	14,00	6,55	0,01	0,96	12,00	16,95	9,97	9,73
	15,00	6,85	0,00	0,96	12,00	21,48	9,42	10,29
	16,00	7,15	0,00	0,97	12,00	27,08	8,75	11,08
	17,00	7,45	0,00	0,97	12,00	33,91	7,93	12,23
18,00	7,74	0,00	0,97	12,00	42,18	6,94	13,98	

ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΚΕΑ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	4,17
	1,00	1,13	0,10	0,10	12,00	0,79	11,91	4,20
	2,00	1,79	0,13	0,23	12,00	1,25	11,85	4,22
	3,00	2,34	0,14	0,37	12,00	1,66	11,80	4,24
	4,00	2,84	0,13	0,50	12,00	2,04	11,75	4,25
	5,00	3,29	0,12	0,61	12,00	2,45	11,71	4,27
	6,00	3,72	0,10	0,71	12,00	2,92	11,65	4,29
	7,00	4,12	0,08	0,79	12,00	3,50	11,58	4,32
	8,00	4,51	0,06	0,85	12,00	4,25	11,49	4,35
	9,00	4,88	0,04	0,89	12,00	5,24	11,37	4,40
	10,00	5,23	0,03	0,92	12,00	6,54	11,22	4,46
	11,00	5,57	0,02	0,94	12,00	8,25	11,01	4,54
	12,00	5,91	0,01	0,96	12,00	10,48	10,74	4,65
	13,00	6,23	0,01	0,97	12,00	13,33	10,40	4,81
	14,00	6,55	0,01	0,97	12,00	16,95	9,97	5,02
	15,00	6,85	0,00	0,98	12,00	21,48	9,42	5,31
	16,00	7,15	0,00	0,98	12,00	27,08	8,75	5,71
	17,00	7,45	0,00	0,98	12,00	33,91	7,93	6,30
18,00	7,74	0,00	0,98	12,00	42,18	6,94	7,21	

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΘΗΡΑ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	12,17
	1,00	1,13	0,09	0,09	12,00	0,79	11,91	12,26
	2,00	1,79	0,12	0,21	12,00	1,25	11,85	12,32
	3,00	2,34	0,13	0,34	12,00	1,66	11,80	12,37
	4,00	2,84	0,12	0,47	12,00	2,04	11,75	12,42
	5,00	3,29	0,11	0,58	12,00	2,45	11,71	12,47
	6,00	3,72	0,10	0,68	12,00	2,92	11,65	12,53
	7,00	4,12	0,08	0,76	12,00	3,50	11,58	12,61
	8,00	4,51	0,06	0,82	12,00	4,25	11,49	12,71
	9,00	4,88	0,05	0,86	12,00	5,24	11,37	12,84
	10,00	5,23	0,04	0,90	12,00	6,54	11,22	13,02
	11,00	5,57	0,03	0,93	12,00	8,25	11,01	13,26
	12,00	5,91	0,02	0,94	12,00	10,48	10,74	13,59
	13,00	6,23	0,01	0,96	12,00	13,33	10,40	14,04
	14,00	6,55	0,01	0,97	12,00	16,95	9,97	14,65
	15,00	6,85	0,01	0,97	12,00	21,48	9,42	15,50
	16,00	7,15	0,00	0,98	12,00	27,08	8,75	16,68
	17,00	7,45	0,00	0,98	12,00	33,91	7,93	18,41
18,00	7,74	0,00	0,98	12,00	42,18	6,94	21,04	

ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΠΑΡΟΣ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	8,00
	1,00	1,13	0,09	0,09	12,00	0,79	11,91	8,06
	2,00	1,79	0,12	0,20	12,00	1,25	11,85	8,10
	3,00	2,34	0,13	0,33	12,00	1,66	11,80	8,13
	4,00	2,84	0,12	0,46	12,00	2,04	11,75	8,17
	5,00	3,29	0,11	0,57	12,00	2,45	11,71	8,20
	6,00	3,72	0,10	0,67	12,00	2,92	11,65	8,24
	7,00	4,12	0,08	0,75	12,00	3,50	11,58	8,29
	8,00	4,51	0,06	0,81	12,00	4,25	11,49	8,36
	9,00	4,88	0,05	0,86	12,00	5,24	11,37	8,44
	10,00	5,23	0,04	0,90	12,00	6,54	11,22	8,56
	11,00	5,57	0,03	0,92	12,00	8,25	11,01	8,72
	12,00	5,91	0,02	0,94	12,00	10,48	10,74	8,94
	13,00	6,23	0,01	0,96	12,00	13,33	10,40	9,23
	14,00	6,55	0,01	0,97	12,00	16,95	9,97	9,63
	15,00	6,85	0,01	0,97	12,00	21,48	9,42	10,19
	16,00	7,15	0,00	0,98	12,00	27,08	8,75	10,97
	17,00	7,45	0,00	0,98	12,00	33,91	7,93	12,11
18,00	7,74	0,00	0,98	12,00	42,18	6,94	13,84	

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΝΑΞΟΣ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	8,58
	1,00	1,13	0,08	0,08	12,00	0,79	11,91	8,65
	2,00	1,79	0,11	0,18	12,00	1,25	11,85	8,69
	3,00	2,34	0,12	0,30	12,00	1,66	11,80	8,73
	4,00	2,84	0,12	0,43	12,00	2,04	11,75	8,76
	5,00	3,29	0,11	0,54	12,00	2,45	11,71	8,80
	6,00	3,72	0,10	0,64	12,00	2,92	11,65	8,84
	7,00	4,12	0,08	0,72	12,00	3,50	11,58	8,89
	8,00	4,51	0,07	0,79	12,00	4,25	11,49	8,96
	9,00	4,88	0,05	0,85	12,00	5,24	11,37	9,06
	10,00	5,23	0,04	0,89	12,00	6,54	11,22	9,18
	11,00	5,57	0,03	0,92	12,00	8,25	11,01	9,36
	12,00	5,91	0,02	0,94	12,00	10,48	10,74	9,59
	13,00	6,23	0,02	0,96	12,00	13,33	10,40	9,90
	14,00	6,55	0,01	0,97	12,00	16,95	9,97	10,34
	15,00	6,85	0,01	0,97	12,00	21,48	9,42	10,93
	16,00	7,15	0,00	0,98	12,00	27,08	8,75	11,77
	17,00	7,45	0,00	0,98	12,00	33,91	7,93	12,99
18,00	7,74	0,00	0,98	12,00	42,18	6,94	14,84	

ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΣΥΡΟΣ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	6,92
	1,00	1,13	0,08	0,08	12,00	0,79	11,91	6,97
	2,00	1,79	0,12	0,20	12,00	1,25	11,85	7,00
	3,00	2,34	0,13	0,33	12,00	1,66	11,80	7,03
	4,00	2,84	0,13	0,45	12,00	2,04	11,75	7,06
	5,00	3,29	0,12	0,57	12,00	2,45	11,71	7,09
	6,00	3,72	0,10	0,67	12,00	2,92	11,65	7,12
	7,00	4,12	0,08	0,75	12,00	3,50	11,58	7,17
	8,00	4,51	0,07	0,82	12,00	4,25	11,49	7,22
	9,00	4,88	0,05	0,87	12,00	5,24	11,37	7,30
	10,00	5,23	0,04	0,90	12,00	6,54	11,22	7,40
	11,00	5,57	0,03	0,93	12,00	8,25	11,01	7,54
	12,00	5,91	0,02	0,95	12,00	10,48	10,74	7,73
	13,00	6,23	0,01	0,96	12,00	13,33	10,40	7,98
	14,00	6,55	0,01	0,97	12,00	16,95	9,97	8,33
	15,00	6,85	0,01	0,98	12,00	21,48	9,42	8,81
	16,00	7,15	0,00	0,98	12,00	27,08	8,75	9,48
	17,00	7,45	0,00	0,98	12,00	33,91	7,93	10,47
18,00	7,74	0,00	0,98	12,00	42,18	6,94	11,96	

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΜΥΚΟΝΟΣ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	7,83
	1,00	1,13	0,07	0,07	12,00	0,79	11,91	7,90
	2,00	1,79	0,10	0,16	12,00	1,25	11,85	7,93
	3,00	2,34	0,11	0,28	12,00	1,66	11,80	7,97
	4,00	2,84	0,12	0,39	12,00	2,04	11,75	8,00
	5,00	3,29	0,11	0,51	12,00	2,45	11,71	8,03
	6,00	3,72	0,10	0,61	12,00	2,92	11,65	8,07
	7,00	4,12	0,09	0,69	12,00	3,50	11,58	8,12
	8,00	4,51	0,07	0,77	12,00	4,25	11,49	8,18
	9,00	4,88	0,06	0,83	12,00	5,24	11,37	8,27
	10,00	5,23	0,05	0,87	12,00	6,54	11,22	8,38
	11,00	5,57	0,03	0,91	12,00	8,25	11,01	8,54
	12,00	5,91	0,03	0,93	12,00	10,48	10,74	8,75
	13,00	6,23	0,02	0,95	12,00	13,33	10,40	9,04
	14,00	6,55	0,01	0,96	12,00	16,95	9,97	9,43
	15,00	6,85	0,01	0,97	12,00	21,48	9,42	9,98
	16,00	7,15	0,01	0,98	12,00	27,08	8,75	10,74
17,00	7,45	0,00	0,98	12,00	33,91	7,93	11,85	
18,00	7,74	0,00	0,98	12,00	42,18	6,94	13,55	

ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΤΗΝΟΣ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	7,17
	1,00	1,13	0,08	0,08	12,00	0,79	11,91	7,22
	2,00	1,79	0,12	0,20	12,00	1,25	11,85	7,26
	3,00	2,34	0,13	0,33	12,00	1,66	11,80	7,29
	4,00	2,84	0,13	0,45	12,00	2,04	11,75	7,32
	5,00	3,29	0,12	0,57	12,00	2,45	11,71	7,35
	6,00	3,72	0,10	0,67	12,00	2,92	11,65	7,38
	7,00	4,12	0,08	0,75	12,00	3,50	11,58	7,43
	8,00	4,51	0,07	0,82	12,00	4,25	11,49	7,48
	9,00	4,88	0,05	0,87	12,00	5,24	11,37	7,56
	10,00	5,23	0,04	0,90	12,00	6,54	11,22	7,67
	11,00	5,57	0,03	0,93	12,00	8,25	11,01	7,81
	12,00	5,91	0,02	0,95	12,00	10,48	10,74	8,01
	13,00	6,23	0,01	0,96	12,00	13,33	10,40	8,27
	14,00	6,55	0,01	0,97	12,00	16,95	9,97	8,63
	15,00	6,85	0,01	0,98	12,00	21,48	9,42	9,13
	16,00	7,15	0,00	0,98	12,00	27,08	8,75	9,83
17,00	7,45	0,00	0,98	12,00	33,91	7,93	10,84	
18,00	7,74	0,00	0,98	12,00	42,18	6,94	12,39	

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΑΝΔΡΟΣ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	6,67
	1,00	1,13	0,08	0,08	12,00	0,79	11,91	6,72
	2,00	1,79	0,12	0,20	12,00	1,25	11,85	6,75
	3,00	2,34	0,13	0,33	12,00	1,66	11,80	6,78
	4,00	2,84	0,13	0,45	12,00	2,04	11,75	6,81
	5,00	3,29	0,12	0,57	12,00	2,45	11,71	6,83
	6,00	3,72	0,10	0,67	12,00	2,92	11,65	6,87
	7,00	4,12	0,08	0,75	12,00	3,50	11,58	6,91
	8,00	4,51	0,07	0,82	12,00	4,25	11,49	6,96
	9,00	4,88	0,05	0,87	12,00	5,24	11,37	7,04
	10,00	5,23	0,04	0,90	12,00	6,54	11,22	7,13
	11,00	5,57	0,03	0,93	12,00	8,25	11,01	7,27
	12,00	5,91	0,02	0,95	12,00	10,48	10,74	7,45
	13,00	6,23	0,01	0,96	12,00	13,33	10,40	7,69
	14,00	6,55	0,01	0,97	12,00	16,95	9,97	8,03
	15,00	6,85	0,01	0,98	12,00	21,48	9,42	8,49
	16,00	7,15	0,00	0,98	12,00	27,08	8,75	9,14
	17,00	7,45	0,00	0,98	12,00	33,91	7,93	10,09
18,00	7,74	0,00	0,98	12,00	42,18	6,94	11,53	

ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΧΙΟΣ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	12,75
	1,00	1,13	0,07	0,07	12,00	0,79	11,91	12,85
	2,00	1,79	0,11	0,18	12,00	1,25	11,85	12,91
	3,00	2,34	0,12	0,30	12,00	1,66	11,80	12,96
	4,00	2,84	0,12	0,42	12,00	2,04	11,75	13,02
	5,00	3,29	0,11	0,53	12,00	2,45	11,71	13,07
	6,00	3,72	0,10	0,63	12,00	2,92	11,65	13,13
	7,00	4,12	0,09	0,72	12,00	3,50	11,58	13,21
	8,00	4,51	0,07	0,79	12,00	4,25	11,49	13,32
	9,00	4,88	0,06	0,85	12,00	5,24	11,37	13,45
	10,00	5,23	0,04	0,89	12,00	6,54	11,22	13,64
	11,00	5,57	0,03	0,92	12,00	8,25	11,01	13,90
	12,00	5,91	0,02	0,94	12,00	10,48	10,74	14,24
	13,00	6,23	0,02	0,96	12,00	13,33	10,40	14,71
	14,00	6,55	0,01	0,97	12,00	16,95	9,97	15,35
	15,00	6,85	0,01	0,97	12,00	21,48	9,42	16,24
	16,00	7,15	0,00	0,98	12,00	27,08	8,75	17,48
	17,00	7,45	0,00	0,98	12,00	33,91	7,93	19,29
18,00	7,74	0,00	0,98	12,00	42,18	6,94	22,05	

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΙΚΑΡΙΑ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	11,92
	1,00	1,13	0,07	0,07	12,00	0,79	11,91	12,01
	2,00	1,79	0,10	0,16	12,00	1,25	11,85	12,07
	3,00	2,34	0,11	0,28	12,00	1,66	11,80	12,12
	4,00	2,84	0,12	0,39	12,00	2,04	11,75	12,17
	5,00	3,29	0,11	0,51	12,00	2,45	11,71	12,22
	6,00	3,72	0,10	0,61	12,00	2,92	11,65	12,27
	7,00	4,12	0,09	0,69	12,00	3,50	11,58	12,35
	8,00	4,51	0,07	0,77	12,00	4,25	11,49	12,45
	9,00	4,88	0,06	0,83	12,00	5,24	11,37	12,58
	10,00	5,23	0,05	0,87	12,00	6,54	11,22	12,75
	11,00	5,57	0,03	0,91	12,00	8,25	11,01	12,99
	12,00	5,91	0,03	0,93	12,00	10,48	10,74	13,31
	13,00	6,23	0,02	0,95	12,00	13,33	10,40	13,75
	14,00	6,55	0,01	0,96	12,00	16,95	9,97	14,35
	15,00	6,85	0,01	0,97	12,00	21,48	9,42	15,18
	16,00	7,15	0,01	0,98	12,00	27,08	8,75	16,34
	17,00	7,45	0,00	0,98	12,00	33,91	7,93	18,03
18,00	7,74	0,00	0,98	12,00	42,18	6,94	20,61	

ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΣΑΜΟΣ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	15,83
	1,00	1,13	0,06	0,06	12,00	0,79	11,91	15,96
	2,00	1,79	0,09	0,14	12,00	1,25	11,85	16,03
	3,00	2,34	0,11	0,25	12,00	1,66	11,80	16,10
	4,00	2,84	0,11	0,36	12,00	2,04	11,75	16,16
	5,00	3,29	0,11	0,48	12,00	2,45	11,71	16,23
	6,00	3,72	0,11	0,58	12,00	2,92	11,65	16,31
	7,00	4,12	0,09	0,68	12,00	3,50	11,58	16,41
	8,00	4,51	0,08	0,76	12,00	4,25	11,49	16,54
	9,00	4,88	0,06	0,82	12,00	5,24	11,37	16,71
	10,00	5,23	0,05	0,87	12,00	6,54	11,22	16,94
	11,00	5,57	0,04	0,91	12,00	8,25	11,01	17,26
	12,00	5,91	0,03	0,94	12,00	10,48	10,74	17,69
	13,00	6,23	0,02	0,96	12,00	13,33	10,40	18,27
	14,00	6,55	0,01	0,97	12,00	16,95	9,97	19,07
	15,00	6,85	0,01	0,98	12,00	21,48	9,42	20,16
	16,00	7,15	0,01	0,98	12,00	27,08	8,75	21,71
	17,00	7,45	0,00	0,99	12,00	33,91	7,93	23,96
18,00	7,74	0,00	0,99	12,00	42,18	6,94	27,38	

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΑΣΤΥΠΑΛΛΙΑ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	16,08
	1,00	1,13	0,09	0,09	12,00	0,79	11,91	16,21
	2,00	1,79	0,11	0,20	12,00	1,25	11,85	16,29
	3,00	2,34	0,12	0,32	12,00	1,66	11,80	16,35
	4,00	2,84	0,12	0,45	12,00	2,04	11,75	16,42
	5,00	3,29	0,11	0,56	12,00	2,45	11,71	16,49
	6,00	3,72	0,10	0,65	12,00	2,92	11,65	16,57
	7,00	4,12	0,08	0,73	12,00	3,50	11,58	16,67
	8,00	4,51	0,07	0,80	12,00	4,25	11,49	16,80
	9,00	4,88	0,05	0,85	12,00	5,24	11,37	16,97
	10,00	5,23	0,04	0,89	12,00	6,54	11,22	17,21
	11,00	5,57	0,03	0,92	12,00	8,25	11,01	17,53
	12,00	5,91	0,02	0,94	12,00	10,48	10,74	17,97
	13,00	6,23	0,01	0,95	12,00	13,33	10,40	18,56
	14,00	6,55	0,01	0,96	12,00	16,95	9,97	19,37
	15,00	6,85	0,01	0,97	12,00	21,48	9,42	20,48
	16,00	7,15	0,00	0,97	12,00	27,08	8,75	22,05
	17,00	7,45	0,00	0,98	12,00	33,91	7,93	24,34
18,00	7,74	0,00	0,98	12,00	42,18	6,94	27,82	

ΠΕΙΡΑΙΑΣ- ΚΑΡΠΑΘΟΣ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	23,92
	1,00	1,13	0,09	0,09	12,00	0,79	11,91	24,11
	2,00	1,79	0,12	0,21	12,00	1,25	11,85	24,22
	3,00	2,34	0,13	0,33	12,00	1,66	11,80	24,32
	4,00	2,84	0,12	0,46	12,00	2,04	11,75	24,42
	5,00	3,29	0,11	0,57	12,00	2,45	11,71	24,52
	6,00	3,72	0,10	0,67	12,00	2,92	11,65	24,64
	7,00	4,12	0,08	0,75	12,00	3,50	11,58	24,78
	8,00	4,51	0,06	0,81	12,00	4,25	11,49	24,98
	9,00	4,88	0,05	0,86	12,00	5,24	11,37	25,24
	10,00	5,23	0,04	0,90	12,00	6,54	11,22	25,59
	11,00	5,57	0,03	0,92	12,00	8,25	11,01	26,07
	12,00	5,91	0,02	0,94	12,00	10,48	10,74	26,72
	13,00	6,23	0,01	0,96	12,00	13,33	10,40	27,60
	14,00	6,55	0,01	0,97	12,00	16,95	9,97	28,80
	15,00	6,85	0,01	0,97	12,00	21,48	9,42	30,46
	16,00	7,15	0,00	0,98	12,00	27,08	8,75	32,80
	17,00	7,45	0,00	0,98	12,00	33,91	7,93	36,19
18,00	7,74	0,00	0,98	12,00	42,18	6,94	41,36	

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΡΟΔΟΣ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	24,83
	1,00	1,13	0,06	0,06	12,00	0,79	11,91	25,03
	2,00	1,79	0,09	0,15	12,00	1,25	11,85	25,15
	3,00	2,34	0,11	0,26	12,00	1,66	11,80	25,25
	4,00	2,84	0,12	0,38	12,00	2,04	11,75	25,35
	5,00	3,29	0,12	0,49	12,00	2,45	11,71	25,46
	6,00	3,72	0,11	0,60	12,00	2,92	11,65	25,58
	7,00	4,12	0,10	0,70	12,00	3,50	11,58	25,73
	8,00	4,51	0,08	0,78	12,00	4,25	11,49	25,94
	9,00	4,88	0,06	0,84	12,00	5,24	11,37	26,21
	10,00	5,23	0,05	0,89	12,00	6,54	11,22	26,57
	11,00	5,57	0,04	0,92	12,00	8,25	11,01	27,07
	12,00	5,91	0,02	0,95	12,00	10,48	10,74	27,74
	13,00	6,23	0,02	0,97	12,00	13,33	10,40	28,65
	14,00	6,55	0,01	0,98	12,00	16,95	9,97	29,90
	15,00	6,85	0,01	0,98	12,00	21,48	9,42	31,63
	16,00	7,15	0,00	0,99	12,00	27,08	8,75	34,05
17,00	7,45	0,00	0,99	12,00	33,91	7,93	37,58	
18,00	7,74	0,00	0,99	12,00	42,18	6,94	42,95	

ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΚΩΣ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	19,83
	1,00	1,13	0,07	0,07	12,00	0,79	11,91	19,99
	2,00	1,79	0,10	0,17	12,00	1,25	11,85	20,09
	3,00	2,34	0,11	0,29	12,00	1,66	11,80	20,17
	4,00	2,84	0,12	0,40	12,00	2,04	11,75	20,25
	5,00	3,29	0,11	0,52	12,00	2,45	11,71	20,33
	6,00	3,72	0,10	0,62	12,00	2,92	11,65	20,43
	7,00	4,12	0,09	0,71	12,00	3,50	11,58	20,55
	8,00	4,51	0,07	0,78	12,00	4,25	11,49	20,71
	9,00	4,88	0,06	0,84	12,00	5,24	11,37	20,93
	10,00	5,23	0,04	0,89	12,00	6,54	11,22	21,22
	11,00	5,57	0,03	0,92	12,00	8,25	11,01	21,62
	12,00	5,91	0,02	0,94	12,00	10,48	10,74	22,15
	13,00	6,23	0,02	0,96	12,00	13,33	10,40	22,88
	14,00	6,55	0,01	0,97	12,00	16,95	9,97	23,88
	15,00	6,85	0,01	0,98	12,00	21,48	9,42	25,26
	16,00	7,15	0,00	0,98	12,00	27,08	8,75	27,20
17,00	7,45	0,00	0,98	12,00	33,91	7,93	30,01	
18,00	7,74	0,00	0,98	12,00	42,18	6,94	34,30	

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΚΑΛΥΜΝΟΣ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	18,25
	1,00	1,13	0,07	0,07	12,00	0,79	11,91	18,40
	2,00	1,79	0,10	0,17	12,00	1,25	11,85	18,48
	3,00	2,34	0,11	0,29	12,00	1,66	11,80	18,56
	4,00	2,84	0,12	0,40	12,00	2,04	11,75	18,63
	5,00	3,29	0,11	0,52	12,00	2,45	11,71	18,71
	6,00	3,72	0,10	0,62	12,00	2,92	11,65	18,80
	7,00	4,12	0,09	0,71	12,00	3,50	11,58	18,91
	8,00	4,51	0,07	0,78	12,00	4,25	11,49	19,06
	9,00	4,88	0,06	0,84	12,00	5,24	11,37	19,26
	10,00	5,23	0,04	0,89	12,00	6,54	11,22	19,53
	11,00	5,57	0,03	0,92	12,00	8,25	11,01	19,89
	12,00	5,91	0,02	0,94	12,00	10,48	10,74	20,39
	13,00	6,23	0,02	0,96	12,00	13,33	10,40	21,06
	14,00	6,55	0,01	0,97	12,00	16,95	9,97	21,98
	15,00	6,85	0,01	0,98	12,00	21,48	9,42	23,24
	16,00	7,15	0,00	0,98	12,00	27,08	8,75	25,03
	17,00	7,45	0,00	0,98	12,00	33,91	7,93	27,61
18,00	7,74	0,00	0,98	12,00	42,18	6,94	31,56	

ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΣΚΥΡΟΣ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	12,00
	1,00	1,13	0,10	0,10	12,00	0,79	11,91	12,10
	2,00	1,79	0,13	0,22	12,00	1,25	11,85	12,15
	3,00	2,34	0,13	0,36	12,00	1,66	11,80	12,20
	4,00	2,84	0,13	0,48	12,00	2,04	11,75	12,25
	5,00	3,29	0,11	0,60	12,00	2,45	11,71	12,30
	6,00	3,72	0,10	0,69	12,00	2,92	11,65	12,36
	7,00	4,12	0,08	0,77	12,00	3,50	11,58	12,44
	8,00	4,51	0,06	0,83	12,00	4,25	11,49	12,53
	9,00	4,88	0,05	0,87	12,00	5,24	11,37	12,66
	10,00	5,23	0,03	0,91	12,00	6,54	11,22	12,84
	11,00	5,57	0,02	0,93	12,00	8,25	11,01	13,08
	12,00	5,91	0,02	0,95	12,00	10,48	10,74	13,40
	13,00	6,23	0,01	0,96	12,00	13,33	10,40	13,85
	14,00	6,55	0,01	0,97	12,00	16,95	9,97	14,45
	15,00	6,85	0,00	0,97	12,00	21,48	9,42	15,28
	16,00	7,15	0,00	0,97	12,00	27,08	8,75	16,46
	17,00	7,45	0,00	0,98	12,00	33,91	7,93	18,16
18,00	7,74	0,00	0,98	12,00	42,18	6,94	20,75	

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΜΥΤΙΛΗΝΗ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	17,92
	1,00	1,13	0,08	0,08	12,00	0,79	11,91	18,06
	2,00	1,79	0,11	0,19	12,00	1,25	11,85	18,14
	3,00	2,34	0,12	0,31	12,00	1,66	11,80	18,22
	4,00	2,84	0,12	0,43	12,00	2,04	11,75	18,29
	5,00	3,29	0,11	0,54	12,00	2,45	11,71	18,37
	6,00	3,72	0,10	0,64	12,00	2,92	11,65	18,46
	7,00	4,12	0,08	0,73	12,00	3,50	11,58	18,57
	8,00	4,51	0,07	0,79	12,00	4,25	11,49	18,71
	9,00	4,88	0,05	0,85	12,00	5,24	11,37	18,91
	10,00	5,23	0,04	0,89	12,00	6,54	11,22	19,17
	11,00	5,57	0,03	0,92	12,00	8,25	11,01	19,53
	12,00	5,91	0,02	0,94	12,00	10,48	10,74	20,01
	13,00	6,23	0,02	0,95	12,00	13,33	10,40	20,67
	14,00	6,55	0,01	0,97	12,00	16,95	9,97	21,57
	15,00	6,85	0,01	0,97	12,00	21,48	9,42	22,82
	16,00	7,15	0,00	0,98	12,00	27,08	8,75	24,57
	17,00	7,45	0,00	0,98	12,00	33,91	7,93	27,11
18,00	7,74	0,00	0,98	12,00	42,18	6,94	30,99	

ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΛΗΜΝΟΣ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	18,42
	1,00	1,13	0,09	0,09	12,00	0,79	11,91	18,56
	2,00	1,79	0,12	0,21	12,00	1,25	11,85	18,65
	3,00	2,34	0,13	0,34	12,00	1,66	11,80	18,73
	4,00	2,84	0,13	0,47	12,00	2,04	11,75	18,80
	5,00	3,29	0,11	0,58	12,00	2,45	11,71	18,88
	6,00	3,72	0,10	0,68	12,00	2,92	11,65	18,97
	7,00	4,12	0,08	0,76	12,00	3,50	11,58	19,08
	8,00	4,51	0,06	0,82	12,00	4,25	11,49	19,23
	9,00	4,88	0,05	0,87	12,00	5,24	11,37	19,43
	10,00	5,23	0,04	0,91	12,00	6,54	11,22	19,71
	11,00	5,57	0,03	0,93	12,00	8,25	11,01	20,07
	12,00	5,91	0,02	0,95	12,00	10,48	10,74	20,57
	13,00	6,23	0,01	0,96	12,00	13,33	10,40	21,25
	14,00	6,55	0,01	0,97	12,00	16,95	9,97	22,18
	15,00	6,85	0,01	0,97	12,00	21,48	9,42	23,46
	16,00	7,15	0,00	0,98	12,00	27,08	8,75	25,25
	17,00	7,45	0,00	0,98	12,00	33,91	7,93	27,87
18,00	7,74	0,00	0,98	12,00	42,18	6,94	31,85	

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΑΜΟΡΓΟΣ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	12,33
	1,00	1,13	0,08	0,08	12,00	0,79	11,91	12,43
	2,00	1,79	0,11	0,18	12,00	1,25	11,85	12,49
	3,00	2,34	0,12	0,30	12,00	1,66	11,80	12,54
	4,00	2,84	0,12	0,43	12,00	2,04	11,75	12,59
	5,00	3,29	0,11	0,54	12,00	2,45	11,71	12,64
	6,00	3,72	0,10	0,64	12,00	2,92	11,65	12,70
	7,00	4,12	0,08	0,72	12,00	3,50	11,58	12,78
	8,00	4,51	0,07	0,79	12,00	4,25	11,49	12,88
	9,00	4,88	0,05	0,85	12,00	5,24	11,37	13,01
	10,00	5,23	0,04	0,89	12,00	6,54	11,22	13,20
	11,00	5,57	0,03	0,92	12,00	8,25	11,01	13,44
	12,00	5,91	0,02	0,94	12,00	10,48	10,74	13,78
	13,00	6,23	0,02	0,96	12,00	13,33	10,40	14,23
	14,00	6,55	0,01	0,97	12,00	16,95	9,97	14,85
	15,00	6,85	0,01	0,97	12,00	21,48	9,42	15,71
	16,00	7,15	0,00	0,98	12,00	27,08	8,75	16,91
17,00	7,45	0,00	0,98	12,00	33,91	7,93	18,66	
18,00	7,74	0,00	0,98	12,00	42,18	6,94	21,33	

ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΣΙΦΝΟΣ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	7,50
	1,00	1,13	0,10	0,10	12,00	0,79	11,91	7,56
	2,00	1,79	0,13	0,22	12,00	1,25	11,85	7,60
	3,00	2,34	0,13	0,36	12,00	1,66	11,80	7,63
	4,00	2,84	0,13	0,48	12,00	2,04	11,75	7,66
	5,00	3,29	0,11	0,59	12,00	2,45	11,71	7,69
	6,00	3,72	0,09	0,69	12,00	2,92	11,65	7,73
	7,00	4,12	0,08	0,76	12,00	3,50	11,58	7,77
	8,00	4,51	0,06	0,82	12,00	4,25	11,49	7,83
	9,00	4,88	0,05	0,87	12,00	5,24	11,37	7,91
	10,00	5,23	0,03	0,90	12,00	6,54	11,22	8,02
	11,00	5,57	0,02	0,93	12,00	8,25	11,01	8,17
	12,00	5,91	0,02	0,95	12,00	10,48	10,74	8,38
	13,00	6,23	0,01	0,96	12,00	13,33	10,40	8,65
	14,00	6,55	0,01	0,96	12,00	16,95	9,97	9,03
	15,00	6,85	0,01	0,97	12,00	21,48	9,42	9,55
	16,00	7,15	0,00	0,97	12,00	27,08	8,75	10,28
17,00	7,45	0,00	0,98	12,00	33,91	7,93	11,35	
18,00	7,74	0,00	0,98	12,00	42,18	6,94	12,97	

ΠΕΙΡΑΙΑΣ-ΛΕΡΟΣ	V(m/sec)	V(beaufort)	f(V)	F(V)	Speed average (knots)	Speed loss (%)	Final speed (knots)	tij (hr)
	0,00	0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	12,00	16,67
	1,00	1,13	0,06	0,06	12,00	0,79	11,91	16,80
	2,00	1,79	0,09	0,14	12,00	1,25	11,85	16,88
	3,00	2,34	0,11	0,25	12,00	1,66	11,80	16,95
	4,00	2,84	0,11	0,36	12,00	2,04	11,75	17,01
	5,00	3,29	0,11	0,48	12,00	2,45	11,71	17,09
	6,00	3,72	0,11	0,58	12,00	2,92	11,65	17,17
	7,00	4,12	0,09	0,68	12,00	3,50	11,58	17,27
	8,00	4,51	0,08	0,76	12,00	4,25	11,49	17,41
	9,00	4,88	0,06	0,82	12,00	5,24	11,37	17,59
	10,00	5,23	0,05	0,87	12,00	6,54	11,22	17,83
	11,00	5,57	0,04	0,91	12,00	8,25	11,01	18,17
	12,00	5,91	0,03	0,94	12,00	10,48	10,74	18,62
	13,00	6,23	0,02	0,96	12,00	13,33	10,40	19,23
	14,00	6,55	0,01	0,97	12,00	16,95	9,97	20,07
	15,00	6,85	0,01	0,98	12,00	21,48	9,42	21,23
	16,00	7,15	0,01	0,98	12,00	27,08	8,75	22,85
	17,00	7,45	0,00	0,99	12,00	33,91	7,93	25,22
18,00	7,74	0,00	0,99	12,00	42,18	6,94	28,82	

Γ. Χρόνοι διαδρομής μεταξύ των κόμβων του δικτύου για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%

	ΠΕΡΑΙΑΣ	ΡΕΘΥΜΝΟ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ	ΚΥΘΗΡΑ	ΜΗΛΟΣ	ΚΕΑ	ΘΗΡΑ	ΠΑΡΟΣ	ΝΑΞΟΣ	ΣΥΡΟΣ	ΜΥΚΟΝΟΣ	ΤΗΝΟΣ	ΑΝΔΡΟΣ	ΧΙΟΣ	ΙΚΑΡΙΑ	ΣΑΜΟΣ	ΑΣΤΥΓΓΑΛΛΗ	ΚΑΡΤΑΘΟΣ	ΡΟΔΟΣ	ΚΩΣ	ΚΑΛΥΜΝΟΣ	ΣΚΥΡΟΣ	ΜΥΤΙΛΗΝΗ	ΛΗΜΝΟΣ	ΑΜΟΡΓΟΣ	ΣΦΗΝΟΣ	ΛΕΡΟΣ
ΠΕΡΑΙΑΣ	0,00	15,82	16,46	13,26	9,53	4,60	13,81	9,08	9,75	7,73	9,04	8,01	7,45	14,48	13,75	18,27	18,56	27,16	27,74	22,52	20,72	13,63	20,67	20,57	14,00	8,52	19,31
ΡΕΘΥΜΝΟ	15,82	0,00	3,39	10,43	9,83	15,87	9,17	12,77	13,36	14,62	15,43	15,58	17,50	22,79	19,06	21,73	13,15	16,28	21,69	18,62	17,31	23,75	28,85	31,23	13,07	11,59	18,15
ΗΡΑΚΛΕΙΟ	16,46	3,39	0,00	13,71	10,71	16,73	6,66	12,38	12,67	14,62	14,93	15,29	17,69	21,83	17,59	19,81	10,88	12,97	18,52	15,92	14,99	24,41	27,79	31,04	11,50	11,99	14,34
ΚΥΘΗΡΑ	13,26	10,43	13,71	0,00	9,83	11,78	12,56	15,08	17,20	13,56	15,72	15,03	14,84	22,40	20,73	24,14	20,03	25,91	29,67	24,66	22,99	20,77	28,27	28,95	17,45	10,79	20,63
ΜΗΛΟΣ	9,53	9,83	10,71	9,83	0,00	6,44	7,86	4,81	5,99	6,06	7,02	6,83	8,08	14,71	12,77	15,77	11,10	17,79	20,91	15,96	14,23	14,38	20,77	22,24	8,25	1,67	12,69
ΚΕΑ	4,60	15,87	16,73	11,78	6,44	0,00	10,19	6,83	7,98	4,83	5,77	4,64	2,84	11,44	12,79	14,71	14,62	22,02	24,03	17,12	15,38	8,89	15,87	15,71	10,10	5,58	14,42
ΘΗΡΑ	13,81	9,17	6,66	12,56	7,86	10,19	0,00	5,90	4,81	7,12	6,98	7,79	11,44	14,15	9,73	12,60	5,48	12,31	15,96	10,98	9,46	17,49	21,63	23,75	3,75	5,40	8,52
ΠΑΡΟΣ	9,08	12,77	12,38	15,08	4,81	6,83	5,90	0,00	1,87	2,50	2,69	3,17	5,67	10,71	5,90	11,06	7,76	15,77	17,32	11,92	10,19	12,40	16,90	19,11	5,01	2,95	9,23
ΝΑΞΟΣ	9,75	13,36	12,67	17,20	5,99	7,98	4,81	1,87	0,00	3,37	2,51	3,27	6,44	9,92	6,32	10,00	6,35	15,10	15,92	10,67	8,94	12,98	16,11	19,33	3,85	4,13	8,17
ΣΥΡΟΣ	7,73	14,62	14,62	13,56	6,06	4,83	7,12	2,50	3,37	0,00	1,61	1,32	3,22	9,23	7,50	11,54	11,44	18,46	19,52	13,65	11,83	9,84	14,62	16,75	7,02	3,46	9,71
ΜΥΚΟΝΟΣ	9,04	15,43	14,93	15,72	7,02	5,77	6,98	2,69	2,51	1,61	0,00	0,96	5,00	8,23	5,62	9,33	8,73	17,31	16,94	11,54	9,81	10,02	13,95	17,12	5,42	5,01	8,17
ΤΗΝΟΣ	8,01	15,58	15,29	15,03	6,83	4,64	7,79	3,17	3,27	1,32	0,96	0,00	3,31	7,79	6,06	10,10	9,62	17,79	18,65	12,69	10,87	9,46	13,27	15,99	6,25	4,71	8,75
ΑΝΔΡΟΣ	7,45	17,50	17,69	14,84	8,08	2,84	11,44	5,67	6,44	3,22	5,00	3,31	0,00	8,37	9,90	12,40	14,62	21,44	23,37	15,77	14,04	6,62	12,98	13,72	9,71	6,25	12,50
ΧΙΟΣ	14,48	22,79	21,83	22,40	14,71	11,44	14,15	10,71	9,92	9,23	8,23	7,79	8,37	0,00	5,42	5,31	13,07	20,77	19,90	12,12	10,96	10,51	5,29	11,92	11,10	12,77	9,03
ΙΚΑΡΙΑ	13,75	19,06	17,59	20,73	12,77	12,79	9,73	5,90	6,32	7,50	5,62	6,06	9,90	5,42	0,00	2,12	7,73	15,48	15,08	7,50	6,06	13,07	13,26	17,02	6,22	10,12	4,81
ΣΑΜΟΣ	18,27	21,73	19,81	24,14	15,77	14,71	12,60	11,06	10,00	11,54	9,33	10,10	12,40	5,31	2,12	0,00	8,84	15,17	14,71	6,14	5,40	14,80	14,04	17,22	8,94	13,85	3,72
ΑΣΤΥΓΓΑΛΛΗ	18,56	13,15	10,88	20,03	11,10	14,62	5,48	7,76	6,35	11,44	8,73	9,62	14,62	13,07	7,73	8,84	0,00	8,52	10,15	5,59	4,10	18,75	21,91	25,00	5,19	10,12	2,79
ΚΑΡΤΑΘΟΣ	27,16	16,28	12,97	25,91	17,79	22,02	12,31	15,77	15,10	18,46	17,31	17,79	21,44	20,77	15,48	15,17	8,52	0,00	8,89	9,46	10,03	27,50	29,33	33,65	11,92	17,60	10,88
ΡΟΔΟΣ	27,74	21,69	18,52	29,67	20,91	24,03	15,96	17,32	15,92	19,52	16,94	18,65	23,37	19,90	15,08	14,71	10,15	8,89	0,00	5,96	8,28	26,81	29,51	33,51	12,94	20,38	9,77
ΚΩΣ	22,52	18,62	15,92	24,66	15,96	17,12	10,98	11,92	10,67	13,65	11,54	12,69	15,77	12,12	7,50	6,14	5,59	9,46	5,96	0,00	1,49	20,87	21,63	27,31	7,88	14,62	3,26
ΚΑΛΥΜΝΟΣ	20,72	17,31	14,99	22,99	14,23	15,38	9,46	10,19	8,94	11,83	9,81	10,87	14,04	10,96	6,06	5,40	4,10	10,03	8,28	1,49	0,00	19,33	20,29	26,06	6,25	12,79	1,86
ΣΚΥΡΟΣ	13,63	23,75	24,41	20,77	14,38	8,89	17,49	12,40	12,98	9,84	10,02	9,46	6,62	10,51	13,07	14,80	18,75	27,50	26,81	20,87	19,33	0,00	10,88	7,57	15,77	12,68	17,79
ΜΥΤΙΛΗΝΗ	20,67	28,85	27,79	28,27	20,77	15,87	21,63	16,90	16,11	14,62	13,95	13,27	12,98	5,29	13,26	14,04	21,91	29,33	29,51	21,63	20,29	10,88	0,00	9,65	19,36	19,13	18,75
ΛΗΜΝΟΣ	20,57	31,23	31,04	28,95	22,24	15,71	23,75	19,11	19,33	16,75	17,12	15,99	13,72	11,92	17,02	17,22	25,00	33,65	33,51	27,31	26,06	7,57	9,65	0,00	22,12	20,15	24,33
ΑΜΟΡΓΟΣ	14,00	13,07	11,50	17,45	8,25	10,10	3,75	5,01	3,85	7,02	5,42	6,25	9,71	11,10	6,22	8,94	5,19	11,92	12,94	7,88	6,25	15,77	19,36	22,12	0,00	6,98	6,73
ΣΦΗΝΟΣ	8,52	11,59	11,99	10,79	1,67	5,58	5,40	2,95	4,13	3,46	5,01	4,71	6,25	12,77	10,12	13,85	10,12	17,60	20,38	14,62	12,79	12,68	19,13	20,15	6,98	0,00	11,54
ΛΕΡΟΣ	19,31	18,15	14,34	20,63	12,69	14,42	8,52	9,23	8,17	9,71	8,17	8,75	12,50	9,03	4,81	3,72	2,79	10,88	9,77	3,26	1,86	17,79	18,75	24,33	6,73	11,54	0,00

Δ. Ποσοστά μεταβολής των χρόνων διαδρομής για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% σε σχέση με τους χρόνους για επίπεδο εμπιστοσύνης 90%

	ΠΕΡΑΙΑΣ	ΡΕΘΥΜΝΟ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ	ΚΥΘΗΡΑ	ΜΗΛΟΣ	ΚΕΑ	ΘΗΡΑ	ΠΑΡΟΣ	ΝΑΞΟΣ	ΣΥΡΟΣ	ΜΥΚΟΝΟΣ	ΤΗΝΟΣ	ΑΝΔΡΟΣ	ΧΙΟΣ	ΚΑΡΙΑ	ΣΑΜΟΣ	ΑΣΤΥΠΑΛΛΗ	ΚΑΡΠΑΘΟΣ	ΡΟΔΟΣ	ΚΩΣ	ΚΑΛΥΜΝΟΣ	ΣΚΥΡΟΣ	ΜΥΤΙΛΗΝΗ	ΛΗΜΝΟΣ	ΑΜΟΡΓΟΣ	ΣΙΦΝΟΣ	ΛΕΡΟΣ
ΠΕΡΑΙΑΣ	0,00	13,08	6,85	17,46	10,19	3,85	5,14	5,14	5,14	4,40	5,86	4,40	4,40	5,14	5,86	6,84	6,84	5,14	3,43	5,14	5,14	6,85	6,84	4,40	5,14	5,95	7,26
ΡΕΘΥΜΝΟ	13,08	0,00	2,45	9,01	9,17	6,84	8,08	9,17	9,17	7,84	7,94	6,84	6,84	6,84	7,94	6,84	5,14	3,85	3,43	3,43	3,43	5,14	6,84	5,14	9,17	9,17	3,43
ΗΡΑΚΛΕΙΟ	6,85	2,45	0,00	9,01	9,17	6,84	8,08	9,17	9,17	6,84	7,94	6,84	6,84	6,84	7,94	6,84	5,14	3,85	3,43	3,43	3,43	5,14	6,84	5,14	9,17	9,17	3,43
ΚΥΘΗΡΑ	17,46	9,01	9,01	0,00	22,72	8,08	0,00	22,72	22,72	9,17	9,17	9,17	9,17	6,84	7,94	6,84	13,42	13,42	9,17	7,94	7,94	6,84	6,84	5,14	13,42	12,09	7,94
ΜΗΛΟΣ	10,19	9,17	9,17	22,72	0,00	6,84	9,17	9,17	9,17	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	5,86	9,17	6,84	5,14	6,84	6,84	5,14	6,84	5,14	9,17	9,17	6,84
ΚΕΑ	3,85	6,84	6,84	8,08	6,84	0,00	6,84	6,84	6,84	5,14	5,14	5,14	5,14	6,84	4,56	5,86	6,84	6,84	5,14	6,84	6,84	5,14	6,84	5,14	6,84	6,84	5,86
ΘΗΡΑ	5,14	8,08	8,08	0,00	9,17	6,84	0,00	7,94	4,56	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	4,56	4,56	6,84	6,84	5,14	5,14	6,84	4,56	5,86	4,56	9,17	5,14
ΠΑΡΟΣ	5,14	9,17	9,17	22,72	9,17	6,84	7,94	0,00	9,17	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	5,86	9,17	6,84	5,14	6,84	6,84	5,14	6,84	5,14	9,17	9,17	6,84
ΝΑΞΟΣ	5,14	9,17	9,17	22,72	9,17	6,84	4,56	9,17	0,00	6,84	9,12	6,84	6,84	6,84	9,12	4,56	4,56	6,84	3,43	5,86	5,86	4,56	6,84	6,84	4,56	9,17	5,86
ΣΥΡΟΣ	4,40	7,84	6,84	9,17	6,84	5,14	6,84	6,84	6,84	0,00	5,14	5,14	5,14	6,84	4,56	5,86	6,84	6,84	5,86	5,86	5,86	5,14	6,84	5,14	6,84	6,84	5,86
ΜΥΚΟΝΟΣ	5,86	7,94	7,94	9,17	6,84	5,14	6,84	6,84	9,12	5,14	0,00	4,56	4,56	9,12	7,80	4,56	9,12	4,56	2,49	5,86	5,86	-0,82	6,84	6,84	9,12	6,84	4,56
ΤΗΝΟΣ	4,40	6,84	6,84	9,17	6,84	5,14	6,84	6,84	6,84	5,14	4,56	0,00	5,14	6,84	4,56	5,86	6,84	6,84	5,86	5,86	5,86	5,14	6,84	5,14	6,84	6,84	5,86
ΑΝΔΡΟΣ	4,40	6,84	6,84	9,17	6,84	5,14	6,84	6,84	6,84	5,14	4,56	5,14	0,00	6,84	4,56	5,86	6,84	6,84	5,86	5,86	5,86	5,14	6,84	5,14	6,84	6,84	5,86
ΧΙΟΣ	5,14	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	9,12	6,84	6,84	0,00	9,12	2,49	6,84	4,56	5,86	5,86	5,86	6,84	6,84	4,56	6,84	6,84	2,49
ΚΑΡΙΑ	5,86	7,94	7,94	7,94	6,84	4,56	6,84	6,84	9,12	4,56	7,80	4,56	4,56	9,12	0,00	4,56	9,12	4,56	2,49	5,86	5,86	7,94	6,84	6,84	9,12	6,84	4,56
ΣΑΜΟΣ	6,84	6,84	6,84	6,84	5,86	5,86	4,56	5,86	4,56	5,86	4,56	5,86	5,86	2,49	4,56	0,00	3,43	3,43	3,43	3,43	3,43	3,43	6,84	3,43	4,56	4,56	3,43
ΑΣΤΥΠΑΛΛΗ	6,84	5,14	5,14	13,42	9,17	6,84	4,56	9,17	4,56	6,84	9,12	6,84	6,84	6,84	9,12	3,43	0,00	5,14	3,43	3,43	3,43	4,56	6,84	4,56	4,56	9,17	3,43
ΚΑΡΠΑΘΟΣ	5,14	3,85	3,85	13,42	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	4,56	6,84	6,84	4,56	4,56	3,43	5,14	0,00	5,14	5,14	5,14	6,84	5,14	6,84	6,84	6,84	5,14
ΡΟΔΟΣ	3,43	3,43	3,43	9,17	5,14	5,14	6,84	5,14	3,43	5,86	2,49	5,86	5,86	5,86	2,49	3,43	3,43	5,14	0,00	3,43	3,43	3,43	3,43	3,43	3,43	6,84	3,43
ΚΩΣ	5,14	3,43	3,43	7,94	6,84	6,84	5,14	6,84	5,86	5,86	5,86	5,86	5,86	5,86	3,43	3,43	5,14	3,43	0,00	3,43	5,86	6,84	5,86	5,86	6,84	6,84	3,43
ΚΑΛΥΜΝΟΣ	5,14	3,43	3,43	7,94	6,84	6,84	5,14	6,84	5,86	5,86	5,86	5,86	5,86	5,86	3,43	3,43	5,14	3,43	3,43	0,00	5,86	6,84	5,86	5,86	6,84	6,84	3,43
ΣΚΥΡΟΣ	6,85	5,14	5,14	6,84	5,14	5,14	6,84	5,14	4,56	5,14	7,94	5,14	5,14	6,84	7,94	3,43	4,56	6,84	3,43	5,86	5,86	0,00	5,14	5,14	4,56	5,14	4,56
ΜΥΤΙΛΗΝΗ	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	4,56	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	5,14	3,43	6,84	6,84	5,14	0,00	5,14	6,84	6,84	4,56
ΛΗΜΝΟΣ	4,40	5,14	5,14	5,14	5,14	5,14	5,86	5,14	6,84	5,14	6,84	5,14	5,14	4,56	6,84	3,43	4,56	6,84	3,43	5,86	5,86	5,14	5,14	0,00	4,56	5,14	5,86
ΑΜΟΡΓΟΣ	5,14	9,17	9,17	13,42	9,17	6,84	4,56	9,17	4,56	6,84	9,12	6,84	6,84	6,84	9,12	4,56	4,56	6,84	3,43	5,86	5,86	4,56	6,84	4,56	0,00	9,17	5,86
ΣΙΦΝΟΣ	5,95	9,17	9,17	12,09	9,17	6,84	9,17	9,17	9,17	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	4,56	9,17	6,84	6,84	6,84	6,84	5,14	6,84	5,14	9,17	0,00	6,84
ΛΕΡΟΣ	7,26	3,43	3,43	7,94	6,84	5,86	5,14	6,84	5,86	5,86	4,56	5,86	5,86	2,49	4,56	3,43	3,43	5,14	3,43	3,43	3,43	4,56	4,56	5,86	5,86	6,84	0,00

ΣΤ. Αναφορές διαδικασίας βελτιστοποίησης από το λογισμικό Evolver

- i) Αναφορά επίλυσης γενετικού αλγορίθμου για την κύρια λύση του προβλήματος δρομολόγησης

Goal	
Cell to Optimize	'Data'!\$D\$5
Type of Goal	Minimum

Results	
Valid Trials	76671
Total Trials	76671
Original Value	369,3232422
+ soft constraint penalties	0
= result	369,3232422
Best Value Found	251,6204529
+ soft constraint penalties	0
= result	251,6204529
Best Simulation Number	45594
Time to Find Best Value	0:20:39
Reason Optimization Stopped	Elapsed time
Time Optimization Started	29/9/2013 14:17
Time Optimization Finished	29/9/2013 14:52
Total Optimization Time	0:35:00
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$5
Original	1
Best	3
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$6
Original	2
Best	1
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$7
Original	3
Best	2
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$8
Original	4
Best	6
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$9
Original	5
Best	25
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$10
Original	6
Best	4

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$11
Original	7
Best	10
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$12
Original	8
Best	24
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$13
Original	9
Best	8
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$14
Original	10
Best	7
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$15
Original	11
Best	9
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$16
Original	12
Best	11
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$17
Original	13
Best	18
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$18
Original	14
Best	17
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$19
Original	15
Best	16
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$20
Original	16
Best	26
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$21
Original	17
Best	20
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$22
Original	18
Best	19
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$23
Original	19
Best	15
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$24
Original	20
Best	14
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$25
Original	21
Best	13

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$26
Original	22
Best	22
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$27
Original	23
Best	23
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$28
Original	24
Best	21
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$29
Original	25
Best	12
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$30
Original	26
Best	5

Adjustable Cells	
Description	
Solving Method	Order
Mutation Rate	0,1
Crossover Rate	0,2
Cell Range	'Data'!\$A\$5:\$A\$30

- ii) Αναφορά επίλυσης γενετικού αλγορίθμου για την εναλλακτική λύση του προβλήματος δρομολόγησης

Goal	
Cell to Optimize	'Data'!\$D\$5
Type of Goal	Minimum

Results	
Valid Trials	41429
Total Trials	41429
Original Value	369,3232422
+ soft constraint penalties	0
= result	369,3232422
Best Value Found	252,7520752
+ soft constraint penalties	0
= result	252,7520752
Best Simulation Number	28127
Time to Find Best Value	0:13:40
Reason Optimization Stopped	Elapsed time
Time Optimization Started	26/9/2013 14:32
Time Optimization Finished	26/9/2013 14:52
Total Optimization Time	0:20:00
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$5
Original	1
Best	1
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$6
Original	2
Best	2
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$7
Original	3
Best	6
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$8
Original	4
Best	16
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$9
Original	5
Best	24
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$10
Original	6
Best	8
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$11
Original	7
Best	5

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$12
Original	8
Best	11
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$13
Original	9
Best	10
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$14
Original	10
Best	9
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$15
Original	11
Best	7
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$16
Original	12
Best	25
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$17
Original	13
Best	4
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$18
Original	14
Best	3
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$19
Original	15
Best	18
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$20
Original	16
Best	17
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$21
Original	17
Best	19
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$22
Original	18
Best	20
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$23
Original	19
Best	26
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$24
Original	20
Best	15
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$25
Original	21
Best	14
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$26
Original	22
Best	13
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$27

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Original	23
Best	22
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$28
Original	24
Best	23
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$29
Original	25
Best	21
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$30
Original	26
Best	12

Adjustable Cells	
Description	
Solving Method	Order
Mutation Rate	0,1
Crossover Rate	0,2
Cell Range	'Data'!\$A\$5:\$A\$30

- iii) Αναφορά επίλυσης γενετικού αλγορίθμου για το 4^ο σενάριο της ανάλυσης ευαισθησίας (95% επίπεδο εμπιστοσύνης για τους χρόνους διαδρομής)

Goal	
Cell to Optimize	'Data'!\$D\$5
Type of Goal	Minimum

Results	
Valid Trials	54937
Total Trials	54937
Original Value	388,7055359
+ soft constraint penalties	0
= result	388,7055359
Best Value Found	268,392395
+ soft constraint penalties	0
= result	268,392395
Best Simulation Number	39571
Time to Find Best Value	0:17:55
Reason Optimization Stopped	Elapsed time
Time Optimization Started	4/10/2013 18:08
Time Optimization Finished	4/10/2013 18:33
Total Optimization Time	0:25:00
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$5
Original	1
Best	1
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$6
Original	2
Best	2
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$7
Original	3
Best	6
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$8
Original	4
Best	25
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$9
Original	5
Best	4
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$10
Original	6
Best	3
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$11
Original	7
Best	10

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$12
Original	8
Best	11
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$13
Original	9
Best	9
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$14
Original	10
Best	7
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$15
Original	11
Best	8
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$16
Original	12
Best	24
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$17
Original	13
Best	14
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$18
Original	14
Best	15
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$19
Original	15
Best	13
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$20
Original	16
Best	16
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$21
Original	17
Best	26
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$22
Original	18
Best	20
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$23
Original	19
Best	19
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$24
Original	20
Best	18
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$25
Original	21
Best	17
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$26
Original	22
Best	22

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$27
Original	23
Best	23
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$28
Original	24
Best	21
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$29
Original	25
Best	12
Adjustable Cell Values	'Data'!\$A\$30
Original	26
Best	5

Adjustable Cells	
Description	
Solving Method	Order
Mutation Rate	0,1
Crossover Rate	0,2
Cell Range	'Data'!\$A\$5:\$A\$30

iv) Αναφορά επίλυσης γενετικού αλγορίθμου για την περίπτωση σύγκρισης με την εργασία των Karlaftis et al. (2009)

Goal	
Cell to Optimize	Data!\$D\$5
Type of Goal	Minimum

Results	
Valid Trials	100477
Total Trials	100477
Original Value	338,0694275
+ soft constraint penalties	0
= result	338,0694275
Best Value Found	271,0718689
+ soft constraint penalties	0
= result	271,0718689
Best Simulation Number	72339
Time to Find Best Value	0:32:24
Reason Optimization Stopped	Elapsed time
Time Optimization Started	12/10/2013 12:51
Time Optimization Finished	12/10/2013 13:36
Total Optimization Time	0:45:00
Adjustable Cell Values	Data!\$A\$5
Original	1
Best	3
Adjustable Cell Values	Data!\$A\$6
Original	2
Best	1
Adjustable Cell Values	Data!\$A\$7
Original	3
Best	2
Adjustable Cell Values	Data!\$A\$8
Original	4
Best	4
Adjustable Cell Values	Data!\$A\$9
Original	5
Best	25
Adjustable Cell Values	Data!\$A\$10
Original	6
Best	7
Adjustable Cell Values	Data!\$A\$11
Original	7
Best	10

Adjustable Cell Values	Data!\$A\$12
Original	8
Best	11
Adjustable Cell Values	Data!\$A\$13
Original	9
Best	9
Adjustable Cell Values	Data!\$A\$14
Original	10
Best	5
Adjustable Cell Values	Data!\$A\$15
Original	11
Best	8
Adjustable Cell Values	Data!\$A\$16
Original	12
Best	6
Adjustable Cell Values	Data!\$A\$17
Original	13
Best	16
Adjustable Cell Values	Data!\$A\$18
Original	14
Best	20
Adjustable Cell Values	Data!\$A\$19
Original	15
Best	15
Adjustable Cell Values	Data!\$A\$20
Original	16
Best	14
Adjustable Cell Values	Data!\$A\$21
Original	17
Best	19
Adjustable Cell Values	Data!\$A\$22
Original	18
Best	18
Adjustable Cell Values	Data!\$A\$23
Original	19
Best	17
Adjustable Cell Values	Data!\$A\$24
Original	20
Best	24
Adjustable Cell Values	Data!\$A\$25
Original	21
Best	13
Adjustable Cell Values	Data!\$A\$26
Original	22
Best	22

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Adjustable Cell Values	Data!\$A\$27
Original	23
Best	23
Adjustable Cell Values	Data!\$A\$28
Original	24
Best	21
Adjustable Cell Values	Data!\$A\$29
Original	25
Best	12

Adjustable Cells	
Description	
Solving Method	Order
Mutation Rate	0,1
Crossover Rate	0,2
Cell Range	Data!\$A\$5:\$A\$29