

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ  
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**



## ΔΠΜΣ

Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία

Διπλωματική Εργασία

Θαλάσσιος κυματισμός και μοντέλα προσδιορισμού βέλτιστης διαδρομής πλοίου (Wave modeling and optimal routing models)

Παναγιώτης Αγαθοκλέους (ΜΝΣΝΔ20001)

Χάρης Κάποντας (ΜΝΣΝΔ20028)

Επιβλέπων:

κ. Γαλάνης Γεώργιος

Πειραιάς

Μάρτιος 2022

## ΔΗΛΩΣΗ ΑΥΘΕΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ / ΖΗΤΗΜΑΤΑ COPYRIGHT

Τα άτομα τα οποία εκπονούν την Διπλωματική Εργασία φέρουν ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στην βάση των εξής παραγόντων: του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης (εμπορικός, μη κερδοσκοπικός ή εκπαιδευτικός), της φύσης του υλικού, που χρησιμοποιούν (τμήμα του κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες ή χάρτες), του ποσοστού και της σημαντικότητας του τμήματος, που χρησιμοποιεί σε σχέση με όλο το κείμενο υπό copyright, και των πιθανών συνεπειών της χρήσης αυτής στην αγορά ή στη γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου.

«Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εγκρίθηκε ομόφωνα από την Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή που ορίστηκε από τη ΕΔιΕ του ΔΠΜΣ σύμφωνα με τον Κανονισμό Λειτουργίας του ΔΠΜΣ ‘Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία’.

Τα μέλη της Επιτροπής ήταν:

ΜΕΛΟΣ Α΄: κ. Γαλάνης Γεώργιος (Επιβλέπων)

ΜΕΛΟΣ Β΄: κ. Παριώτης Ευθύμιος

ΜΕΛΟΣ Γ΄: κ. Λαγούδης Ιωάννης

Η έγκριση της Διπλωματική Εργασίας από το Τμήμα Ναυτιλιακών Σπουδών του Πανεπιστημίου Πειραιώς δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα.»



Παναγιώτης Αγαθοκλέους, Χάρης Κάποντας,  
“Θαλάσσιος κυματισμός και μοντέλα προσδιορισμού βέλτιστης  
διαδρομής πλοίου (*Wave modeling and optimal routing models*)”

*Με την ολοκλήρωση της πτυχιακής μας εργασίας, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Γαλάνη Γεώργιο για τη στήριξη και τη βοήθεια που μας παρείχε καθ’ όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μας εργασίας αλλά και για την άψογη συνεργασία που είχαμε. Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειες μας για τη στήριξη που μας παρείχαν σε όλη τη διάρκεια της φοίτησής μας στο μεταπτυχιακό αυτό πρόγραμμα.*



Παναγιώτης Αγαθοκλέους, Χάρης Κάποντας,  
“Θαλάσσιος κυματισμός και μοντέλα προσδιορισμού βέλτιστης  
διαδρομής πλοίου (*Wave modeling and optimal routing models*)”

## Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται η μελέτη επιλεγμένων μεθόδων οι οποίες χρησιμοποιούνται στην εύρεση βέλτιστης διαδρομής πλοίου και αναλύονται συγκεκριμένα παραδείγματα μέσα από τα οποία προκύπτει η επίδραση των μεθόδων αυτών σε διάφορες περιοχές υπό την επίδραση διαφορετικών καιρικών συνθηκών.

Η εύρεση της βέλτιστης διαδρομής πλοίου είναι ένα ζήτημα που απασχολεί τη ναυτιλία ολοένα και περισσότερο αφού τα λογισμικά εύρεσης βέλτιστης δρομολόγησης πλοίων αναβαθμίζονται και εξελίσσονται συνεχώς προσθέτοντας περισσότερες παραμέτρους έτσι ώστε να μπορούν να γίνουν όσο το δυνατό ακριβέστερα με στόχο την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής του πλοίου και την μέγιστη εξοικονόμηση καυσίμων. Πρόκειται για ένα μεγάλο ζήτημα για τη ναυτιλία με επίδραση στην οικονομία αφού ο στόχος κάθε εμπορικού πλοίου είναι ο καλύτερος συνδυασμός χρόνου - καυσίμων και αυτό υποστηρίζεται μέσα από τις μεθόδους που παρουσιάζονται.

Αρχικά, παρουσιάζεται ο αλγόριθμος Dijkstra, ο τρόπος με τον οποίο βρίσκει την συντομότερη διαδρομή και τα σημεία που πλεονεκτεί και υστερεί. Ακολούθως, προβάλλεται η ισόχρονη μέθοδος και ο τρόπος εύρεσης της βέλτιστης διαδρομής συμπεριλαμβανομένου και της κατάστασης θαλάσσης. Τέλος, αναφέρονται κάποιες πρακτικές εφαρμογές δρομολόγησης πλοίου μέσα από τις οποίες φαίνεται με αριθμητικά δεδομένα, η σημασία και τα οφέλη που αποκομίζονται με την βοήθεια του τρισδιάστατου αλγόριθμου Dijkstra και της τρισδιάστατης τροποποιημένης ισόχρονης μεθόδου.

## Abstract

In the context of this dissertation, selected methods which are used in finding the optimal ship route are presented and specific examples are analyzed and through their study, it is showed the effect of them in different areas under the influence of different weather conditions emerges.



Παναγιώτης Αγαθοκλέους, Χάρης Κάποντας,  
“Θαλάσσιος κυματισμός και μοντέλα προσδιορισμού βέλτιστης  
διαδρομής πλοίου (*Wave modeling and optimal routing models*)”

Finding the best ship route is an issue that concerns shipping more and more as the accounting findings of optimal ship routing are constantly upgraded and evolved by adding more parameters so that they can be as accurate as possible in order to find the best route and maximum fuel savings. It is a big issue for shipping with an impact on the economy since the goal of every merchant ship is the best time-fuel combination and this is supported through the methods presented.

Firstly, the Dijkstra algorithm is presented, the way in which it finds the shortest path and the points that it has advantages and disadvantages. Next, the isochrone method and the way of finding the optimal route including the state of the sea are presented. Finally, some practical ship navigation applications are mentioned, through which it is shown with the numerical data, the importance and the results obtained with the help of the three-dimensional Dijkstra algorithm and the three-dimensional modified isochrone method.

#### Λέξεις – Κλειδιά

Weather routing, Optimal routing, Βέλτιστη διαδρομή πλοίου, Αλγόριθμος Dijkstra, Ισόχρονη μέθοδος, Three-Dimensional Modified Isochrone Method.



## Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	v
Πίνακας Εικόνων .....	ix
Πίνακες .....	x
1. Εισαγωγή .....	1
1.1 Γενικό Πλαίσιο .....	1
1.2 Ορισμός βέλτιστης δρομολόγησης .....	1
1.3 Πρόβλημα της δρομολόγησης .....	2
1.4 Δομή διπλωματικής εργασίας.....	3
2. Ο αλγόριθμος Dijkstra .....	5
2.1 Περιγραφή.....	5
2.2 Σκοπός και μεθοδολογία .....	6
2.3 Βήματα Αλγορίθμου .....	7
2.4 Παραδείγματα .....	9
2.4.1 Παράδειγμα απλής μορφής .....	9
2.4.2 Παράδειγμα δικτύου .....	11
2.5 Τροποποιημένος Αλγόριθμος Dijkstra .....	13
2.6 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα.....	13
2.7 Ψευδόγλωσσα του Αλγορίθμου.....	15
3. Ισόχρονη Μέθοδος.....	17
3.1 Περιγραφή.....	17
3.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Μεθόδου .....	18
3.3 Βελτιωμένη Ισόχρονη Μέθοδος.....	18
4. Πρακτικές εφαρμογές βέλτιστης δρομολόγησης πλοίων.....	21
4.1 Βέλτιστη δρομολόγηση πλοίου με τη χρήση του τρισδιάστατου αλγορίθμου Dijkstra	21
4.1.1 Στοιχεία πλοίου μεταφοράς E/K .....	21
4.1.2 Στοιχεία δρομολογίου .....	21
4.1.3 Αποτελέσματα ταξιδιών με Ανατολική πλευση .....	22
4.1.4 Αποτελέσματα ταξιδιών με Δυτική πλευση .....	25
4.2 Διερεύνηση της βέλτιστης δρομολόγησης πλοίων στην Ανταρκτική με την βοήθεια του αλγορίθμου Dijkstra .....	27
4.3 Εφαρμογή της τρισδιάστατης τροποποιημένης ισόχρονης μεθόδου .....	31



Παναγιώτης Αγαθοκλέους, Χάρης Κάπονας,  
“Θαλάσσιος κυματισμός και μοντέλα προσδιορισμού βέλτιστης  
διαδρομής πλοίου (*Wave modeling and optimal routing models*)”

5. Συμπεράσματα – Συζήτηση .....	34
5.1 Γενικά.....	34
5.2 Προτάσεις μελλοντικής έρευνας.....	35
Βιβλιογραφία.....	37





## Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: Επίλυση του Αλγόριθμου Dijkstra αρχίζοντας από τον κόμβο Α.....	9
Εικόνα 2: Βήματα 1-3 επίλυσης Αλγόριθμου Dijkstra.....	9
Εικόνα 3 Βήματα 3-5 Επίλυσης Αλγόριθμου Dijkstra .....	10
Εικόνα 4: Παράδειγμα Δικτύου Εφαρμογής Αλγόριθμου Dijkstra .....	11
Εικόνα 5:Βέλτιστη διαδρομή στο δίκτυο.....	12
Εικόνα 6: Ο αλγόριθμος Dijkstra στη C++.....	15
Εικόνα 7: Ο αλγόριθμος Dijkstra στη Matlab.....	16
Εικόνα 8:Γενική εικόνα της Ισόχρονης Μεθόδου .....	17
Εικόνα 9: Παράδειγμα προσδιορισμού μιας οικονομικής διαδρομής χρησιμοποιώντας την βελτιωμένη ισόχρονη μέθοδο.....	19
Εικόνα 10:Ταξίδια με Δυτική Πλεύση.....	22
Εικόνα 11: Ταξίδια με Ανατολική Πλεύση .....	22
Εικόνα 12:Στοιχεία Ταξιδιού 20080117 .....	23
Εικόνα 13:Στοιχεία Ταξιδιού 20081224 .....	24
Εικόνα 14:Στοιχεία Ταξιδιού 20080129 .....	26
Εικόνα 15:Στοιχεία Ταξιδιού 20081214 .....	27
Εικόνα 16:Αλγόριθμος επίτευξη της βέλτιστης θαλάσσιας διαδρομής στον πάγο .....	29
Εικόνα 17:Προτεινόμενη Διαδρομή για τον Μάρτιο 2019.....	30
Εικόνα 18:Προτεινόμενη Διαδρομή για Φεβρουάριο 2019 . Αριστερά :Εφικτή Διαδρομή, Δεξιά: Βέλτιστη Διαδρομή.....	30
Εικόνα 19:Γενικές περιγραφές συνθηκών ταξιδιού και ελαχιστοποίηση κατανάλωσης καυσίμου.....	33



Παναγιώτης Αγαθοκλέους, Χάρης Κάπονας,  
“Θαλάσσιος κυματισμός και μοντέλα προσδιορισμού βέλτιστης  
διαδρομής πλοίου (*Wave modeling and optimal routing models*)”

## Πίνακες

Πίνακας 1: Υπολογισμοί για την εύρεση Βέλτιστης διαδρομής.....	12
Πίνακας 2: Πίνακας Αποτελεσμάτων Ταξιδίων Ανατολικής Πλεύσης.....	22
Πίνακας 3: Πίνακας Αποτελεσμάτων Ταξιδίων Δυτικής Πλεύσης.....	25
Πίνακας 4: Χρόνος που πάρθηκε για προτεινόμενη διαδρομή για το Μάρτιο του 2019 αρχόμενη από την δεδομένη ημερομηνία .....	30
Πίνακας 5: Χρόνος που πάρθηκε για 2 προτεινόμενες διαδρομές για τον Φεβρουάριο 2019 με αρχόμενες ημερομηνίες.....	31
Πίνακας 6: Γενική περιγραφή Ταξιδιού (Va: Εφικτή ταχύτητα πλοίου).....	32



## 1. Εισαγωγή

### 1.1 Γενικό Πλαίσιο

Οι θαλάσσιες μεταφορές είναι ο κύριος τρόπος μεταφοράς για το εγχώριο και διεθνές εμπόριο. Αυτό εξηγείται και από το γεγονός ότι η Ναυτιλιακή Βιομηχανία καταναλώνει περίπου το 5% της Παγκόσμιας παραγωγής πετρελαίου, το οποίο πρακτικά αντιστοιχεί σε περίπου 4 εκατομμύρια βαρέλια πετρελαίου την ημέρα. Οι μεγάλες αυτές ποσότητες ενέργειας έχουν ως αποτέλεσμα τις υψηλές εκπομπές αερίων. Οι εκπομπές από αυτά τα πλοία έχουν γίνει σημαντική πηγή ατμοσφαιρικής ρύπανσης, ειδικά για τις παράκτιες περιοχές. Σύμφωνα με τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO), εξειδικευμένη υπηρεσία των Ηνωμένων Εθνών αναφέρει ότι περίπου το 2,2% των παγκόσμιων εκπομπών CO<sub>2</sub> παρήχθησαν από τα πλοία το 2012. Το επίπεδο αυτό προβλέπεται να αυξηθεί κατά 50–250% έως το 2050. Επιπλέον, αυτά τα πλοία παρήγαγαν περίπου το 13% και το 12% των παγκόσμιων εκπομπών NO<sub>x</sub> και SO<sub>x</sub>, αντίστοιχα κατά το 2012. Ο IMO κατέβαλε μεγάλες προσπάθειες για τη μείωση των αερίων αυτών καθιερώνοντας ένα παγκόσμιο όριο στην περιεκτικότητα θείου στα καύσιμα των πλοίων σε 0,50% από το 2020 και μέσω κάποιων περιοχών ελέγχου των εκπομπών των αέριων ρύπων. Εκτός από τον στόχο για την μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων μέσω των κανονισμών για εναλλακτικά καύσιμα, εφαρμόζεται ένας άλλος τρόπος για τη μείωση κατανάλωσης καυσίμου και ως επακόλουθο την μείωση των αέριων ρύπων με την βοήθεια διάφορων αλγορίθμων βέλτιστης δρομολόγησης πλοίων.

Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης θαλάσσιου δρομολογίου μπορούν να παίρνουν διάφορα δεδομένα από Διεθνείς Μετεωρολογικές Υπηρεσίες, όπως η ταχύτητα, η πορεία και η ένταση του άνεμου, το ύψος και η περίοδος του κύματος να τα επεξεργάζονται και να εξάγουν βέλτιστες διαδρομές όσον αφορά τόσο τον χρόνο ταξιδιού όσο και την κατανάλωση καυσίμου.

### 1.2 Ορισμός βέλτιστης δρομολόγησης

Η βέλτιστη δρομολόγηση πλοίων είναι η τέχνη και η επιστήμη της ανάπτυξης της «βέλτιστης διαδρομής» για ένα πλοίο με βάση τις υπάρχουσες καιρικές προβλέψεις, τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του πλοίου και τις ειδικές απαιτήσεις φορτίου. Για τις περισσότερες μεταφορές αυτό σημαίνει τον ελάχιστο χρόνο διέλευσης κατά τον



Παναγιώτης Αγαθοκλέους, Χάρης Κάποντας,  
“Θαλάσσιος κυματισμός και μοντέλα προσδιορισμού βέλτιστης  
διαδρομής πλοίου (*Wave modeling and optimal routing models*)”

οποίο αποφεύγεται σημαντικά ο κίνδυνος για το σκάφος, το πλήρωμα και το φορτίο. Ο στόχος δεν είναι να αποφευχθούν όλες οι δυσμενείς καιρικές συνθήκες, αλλά να βρεθεί η καλύτερη ισορροπία για να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος διέλευσης και η κατανάλωση καυσίμου, χωρίς να θέσει το σκάφος σε κίνδυνο από καιρικές συνθήκες ή τραυματισμό του πληρώματος. Ο προγραμματισμός διαδρομής κανονικά θα ξεκινήσει την αναθεώρηση των κατάλληλων Οδηγών Σχεδιασμού για τον προσδιορισμό των φυσικών καιρικών συνθηκών, των κινδύνων που προκύπτουν από τα καιρικά φαινόμενα και των επικρατούντων ωκεάνιων ρευμάτων. Στη συνέχεια, η Υπηρεσία Δρομολόγησης αναθεωρεί τα πρόσφατα πρότυπα καιρού και τα διαγράμματα πρόγνωσης καιρού για να καθορίσει τις πιο πιθανές συνθήκες κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Ένα προειδοποιητικό μήνυμα δρομολόγησης μεταδίδεται στον πλοίαρχο ενός σκάφους πριν από την αναχώρηση με μια λεπτομερή πρόβλεψη των διαδρομών που αναμένεται να υπάρξει καταιγίδα, μια αρχική προτεινόμενη διαδρομή με αιτιολόγηση πίσω από τη σύσταση της και επίσης τις αναμενόμενες καιρικές συνθήκες που θα αντιμετωπιστούν κατά μήκος αυτής της διαδρομής. Αυτό επιτρέπει στον πλοίαρχο να σχεδιάσει καλύτερα τη διαδρομή του και προσφέρει την ευκαιρία να επικοινωνήσει με την υπηρεσία για τυχόν ιδιαίτερες ανησυχίες που μπορεί να έχει λόγω ειδικών απαιτήσεων φορτίου ή κατάστασης πλοίου. Μόλις το σκάφος αναχωρήσει, η πρόοδος του πλοίου παρακολουθείται στενά με τις ενημερωμένες καιρικές συνθήκες και διαδρομές να αποστέλλονται όταν απαιτείται.

### 1.3 Πρόβλημα της δρομολόγησης

Το πρόβλημα επιλογής βέλτιστης διαδρομής με την ελάχιστη κατανάλωση καυσίμου ενός πλοίου είναι δύσκολο να καθοριστεί λόγω των πολλαπλών παραγόντων που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Η σοβαρότητα των θαλάσσιων καταστάσεων που πρέπει να αντιμετωπισθούν κατά τη διάρκεια του ταξιδιού δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων με βεβαιότητα και πρέπει να εκτιμηθεί από τις καιρικές προβλέψεις που παρέχονται για τις εκάστοτε διαδρομές. Σε κακές καιρικές συνθήκες επηρεάζονται σε διαφορετικό βαθμό η ταχύτητα και η πορεία του πλοίου, πρέπει να πληρούνται τα κριτήρια ασφαλείας για την προστασία του φορτίου και της γάστρας του πλοίου. Έτσι, πρέπει να είναι διαθέσιμος ένας αλγόριθμος που να μπορεί να εκτελεστεί σε πραγματικό χρόνο για να καθοριστεί η βέλτιστη ταχύτητα και η πορεία του πλοίου σε



Παναγιώτης Αγαθοκλέους, Χάρης Κάποντας,  
“Θαλάσσιος κυματισμός και μοντέλα προσδιορισμού βέλτιστης  
διαδρομής πλοίου (*Wave modeling and optimal routing models*)”

άσχημες καιρικές συνθήκες προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση καυσίμου με την επιφύλαξη των κριτηρίων ασφαλείας( (Dongfang Ma, 2020), ((M), 2008)).

## 1.4 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική είναι χωρισμένη σε πέντε ενότητες. Θα επικεντρωθούμε στην επεξήγηση δύο αλγορίθμων εύρεσης της βέλτιστης δρομολόγησης πλοίου μέσω κάποιων απλών πραγματικών παραδειγμάτων. Επιλέχθηκαν η πρώτη ως μια απλή αλλά χαρακτηριστική της περίπτωση της μεθοδολογίας που μας συνδέει και με βασικές αρχές της επιχειρησιακής έρευνας και θεωρίας δικτύων και η δεύτερη ως μια πιο προχωρημένη μέθοδος που εισάγει επιπλέον κριτήρια για τη θέση νησιών κλπ.

Αρχικά, θα παρουσιάσουμε τον Αλγόριθμο Dijkstra όπως αυτός αναπτύσσεται μέσα από το βιβλίο των S. Dasgupta, C.H.Papadimitriou και U. V. Vazirani και τι ακριβώς κατορθώνει με την εφαρμογή του. Διακρίνουμε τα βήματα που ακολουθούμε σε αυτόν και στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε ένα παράδειγμα αυτού. Ακολούθως, προβάλλεται ο τροποποιημένος Αλγόριθμος Dijkstra μέσα από τη διατριβή του Eskild και τέλος εξάγονται κάποια βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής.

Στο Κεφάλαιο 3 μέσα από το άρθρο τους οι Xianming Zhu, Hongbo Wang, Zihao Shen, Hongjun L, περιγράφουν την Ισόχρονη μέθοδο ως ακόμη μία λύση για την βέλτιστη δρομολόγηση πλοίων. Επεξηγείται η μέθοδος και ο σκοπός της στις θαλάσσιες διαδρομές. Αργότερα δίνεται η Βελτιωμένη ισόχρονη μέθοδος ή μέθοδος ισόχρονης, που προτείνεται μέσα από το άρθρο του Roh, Myung-II για μη αυτόματη χρήση και βασίζεται σε γεωμετρικά καθορισμένα και αναδρομικά καθορισμένα χρονικά όρια (ισόχρονες). Προβάλλεται ένα παράδειγμα χρήσης της μεθόδου αυτής και συνάγονται κάποια βασικά συμπεράσματα για το που πλεονεκτεί και που υστερεί στο άρθρο των Helong Wang, Wengang Mao και Leif E.B. Eriksson και τέλος παρουσιάζεται ακόμη ένα παράδειγμα βέλτιστης δρομολόγησης πλοίων στην Ανταρκτική με την βοήθεια του αλγόριθμου Dijkstra στο άρθρο των Thalís Zis,



Παναγιώτης Αγαθοκλέους, Χάρης Κάπονας,  
“Θαλάσσιος κυματισμός και μοντέλα προσδιορισμού βέλτιστης  
διαδρομής πλοίου (*Wave modeling and optimal routing models*)”

Harilaos N Psaraftis, και Li Ding οι οποίοι προβάλλουν την εξοικονόμηση χρόνου που προκύπτει από την χρήση του αλγόριθμου.

Στο τελευταίο κεφάλαιο, εξάγονται κάποια συμπεράσματα για την εφαρμογή και την αρωγή τους στη μείωση κατανάλωσης καυσίμου και την ελαχιστοποίηση του χρόνου μίας θαλάσσιας διαδρομής. Ακολούθως, παρατίθενται οι πηγές και οι Βιβλιογραφικές Αναφορές που βοήθησαν για τη σύνταξη και υλοποίηση της εργασίας μας.



## 2. Ο αλγόριθμος Dijkstra

### 2.1 Περιγραφή

Ο αλγόριθμος του Dijkstra είναι ένας από τους παλαιότερους αλγόριθμους ελάχιστης διαδρομής και ο πιο διαδεδομένος σε προγράμματα weather routing. Είναι ιδιαίτερα απλός στην εφαρμογή του και απαιτεί δύο βασικές παραδοχές. Να μην υπάρχουν αρνητικά βάρη και να μην μεταβάλλονται τα βάρη κατά τρόπο συνεχή ως προς τον χρόνο διαφορετικά ο αλγόριθμος δεν δίνει σωστό αποτέλεσμα. Αφού ισχύουν οι παραπάνω παραδοχές τότε ο αλγόριθμος του Dijkstra υπολογίζει την ελάχιστη διαδρομή από ένα σημείο εκκίνησης σε όλα τα υπόλοιπα σημεία του πλέγματος ώστε να έχουμε το λιγότερο δυνατό κόστος ( (Ιωάννης, 2009), (Anon., n.d.)).

Ο αλγόριθμος του Dijkstra παρουσιάστηκε από τον Dijkstra (1959) και είναι ένας αλγόριθμος αναζήτησης γραφημάτων. Αυτό ισχύει για το πρόβλημα δρομολόγησης, καθώς δεν θα υπάρξει ποτέ αρνητικός χρόνος ή κατανάλωση καυσίμου για ταξίδια από έναν κόμβο σε άλλο. Το αποτέλεσμα αυτού του αλγορίθμου είναι η συντομότερη διαδρομή, η οποία παρουσιάζει τους κόμβους που επισκέφθηκαν και το συνολικό κόστος (Eskild, 2014).

Για τη λειτουργία του αλγόριθμου, σε ένα διάνυσμα  $d[]$  μεγέθους  $|V|=n$  αποθηκεύουμε την έως τώρα υπολογισμένη απόσταση των κόμβων από την αφετηρία. Κατά την αρχικοποίηση, οι αποστάσεις σημειώνονται  $d[s]=0$  και  $d[v]=+\infty$  για κάθε  $v \neq s$ , όπου  $s$  είναι ο κόμβος-αφετηρία. Επιπλέον ο αλγόριθμος διατηρεί μια ουρά προτεραιότητας  $Q$ , για την επεξεργασία των κόμβων του γραφήματος στη σωστή σειρά, και ένα σύνολο  $S$ , το σύνολο των κόμβων για τους οποίους ο αλγόριθμος έχει βρει την ελάχιστη διαδρομή. Στην  $Q$  εισάγονται όλοι οι κόμβοι του γραφήματος με κλειδί την τιμή  $d[*]$ , ενώ το σύνολο  $S$  είναι αρχικά κενό. Τέλος, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί ένα ακόμη διάνυσμα, το  $prev[]$ , μεγέθους  $n$ , στο οποίο για κάθε κόμβο  $u$  αποθηκεύεται ο αμέσως προηγούμενος κόμβος στο ελάχιστο μονοπάτι προς τον  $u$ . Για παράδειγμα, έστω ότι το ελάχιστο μονοπάτι από τον  $s$  στον  $b$  περνά πρώτα από τον  $a$  και αμέσως μετά φτάνει στον  $b$ . Τότε,  $prev[b]=a$ . Αρχικά, κάθε θέση του διανύσματος  $prev[]$  λαμβάνει την τιμή  $null$  (κενό).



Μετά την αρχικοποίηση των δομών που χρησιμοποιεί, ο αλγόριθμος εξάγει από την  $Q$  τον κόμβο  $x$  με το ελάχιστο  $d[*]$  και τον εισάγει στο σύνολο  $S$ . Στο πρώτο βήμα, για παράδειγμα, θα εξάγει τον κόμβο-αφετηρία  $s$ , αφού  $d[s]=0$  ενώ όλοι οι υπόλοιποι κόμβοι έχουν άπειρο  $d[*]$ . Για κάθε γειτονικό  $y$  (του  $x$ ) που δεν ανήκει στο σύνολο  $S$ , αν  $d[y] > d[x] + w(x,y)$  τότε ενημερώνει το  $d[y]$  καταχωρώντας του την τιμή  $d[x] + w(x,y)$  και θέτει  $prev[y]=x$ . Δηλαδή, αν ο αλγόριθμος υπολογίσει ένα ελαφρύτερο (από το ήδη υπολογισμένο) μονοπάτι για τον κόμβο  $y$ , τότε σημειώνει το κόστος του ( $d[y]$ ) και τον αμέσως προηγούμενο κόμβο του νέου υπολογισμένου μονοπατιού ( $prev[y]$ ). Με την αλλαγή του  $d[y]$  αλλάζει και η θέση του κόμβου  $y$  στην ουρά προτεραιότητας  $Q$ . Για την ακρίβεια, μεγαλώνει η προτεραιότητα του  $y$ , αφού κάθε νέα τιμή του  $d[y]$  είναι πάντα μικρότερη από την προηγούμενη. Αφού ο αλγόριθμος εξετάσει όλους τους γείτονες του  $x$  που δεν ανήκουν στο σύνολο  $S$ , εισάγει στο  $S$  τον κόμβο με το ελάχιστο  $d[*]$  από όλους όσους δεν ανήκουν στο  $S$ . Έπειτα, ο αλγόριθμος επιλέγει πάλι τον πρώτο σε προτεραιότητα κόμβο από την ουρά  $Q$  και επαναλαμβάνει τα βήματα αυτά μέχρι να αδειάσει η  $Q$ .

Όταν πλέον η  $Q$  θα έχει αδειάσει, ο αλγόριθμος θα έχει βρει τα ελάχιστα μονοπάτια από τον κόμβο  $s$  προς τους όλους τους υπόλοιπους και τα κόστη τους. Ο αλγόριθμος είναι άπληστος (greedy), σε κάθε βήμα, εξετάζει μόνο τους γειτονικούς ενός κόμβου (τοπικότητα). Βρίσκει τον κόμβο για τον οποίο έχει υπολογίσει την ελάχιστη διαδρομή και τον εισάγει στο σύνολο  $S$ , χρησιμοποιώντας πληροφορίες από προηγούμενα βήματα (σύνθεση). Στο τέλος δίνει ένα αποτέλεσμα για όλους τους κόμβους ( (Anon., n.d.) (S. Dasgupta, 2006)).

## 2.2 Σκοπός και μεθοδολογία

Ο σκοπός του αλγόριθμου αυτού είναι να βρούμε σε ένα δίκτυο, τον ταχύτερο δρόμο, δηλαδή τη διαδρομή με τη μικρότερη απόσταση που θα ακολουθήσουμε για να φτάσουμε στον προορισμό μας. Με τη βοήθεια δύο βοηθητικών πινάκων με την ονομασία προσωρινή ετικέτα (temporary labels)  $d$ , και μόνιμη ετικέτα (permanent labels)  $r$ . Για κάθε δίκτυο υπάρχει ένας πίνακας , ο πίνακας κόστους, τα στοιχεία του οποίου εκφράζουν κάποια όρια ή ικανότητες συστήματος όπως είναι η





απόσταση, το κόστος μεταφοράς, η χωρητικότητα, η μέγιστη αντοχή γραμμών μεταφοράς κ.ο.κ. Αρχικά, ορίζουμε τον κόμβο έναρξης και τον κόμβο τερματισμού. Εφόσον δεν υπάρχει ζεύξη (link) μεταξύ δύο διαφορετικών κόμβων τότε θεωρούμε ότι η αντίστοιχη τιμή τους στον πίνακα κόστους θα είναι άπειρη και θα παριστάνεται από μια μεγάλη τιμή (π.χ. 10000). Θέτουμε το μόνιμο πίνακα με άπειρες τιμές και ακολουθούμε μία συγκεκριμένη διαδικασία μέχρι το στοιχείο που αντιστοιχεί στον τερματισμό της διαδρομής να έχει τιμή διάφορη του απείρου. Ο αλγόριθμος θέτει σε όλους τους κόμβους μία ετικέτα η οποία είναι είτε προσωρινή είτε μόνιμη. Αρχικά όλοι οι κόμβοι, εκτός από τον αρχικό, παίρνει μία προσωρινή ετικέτα που παριστάνει την απόσταση μεταξύ του κόμβου έναρξης (πηγής) και του συγκεκριμένου κόμβου. Στον αρχικό κόμβο δίνουμε τη μόνιμη τιμή του μηδενός. Όποιος κόμβος δεν συνδέεται απευθείας με τον αρχικό κόμβο τότε αποκτά προσωρινή ετικέτα με άπειρη τιμή, ενώ οι υπόλοιποι παίρνουν την προσωρινή ετικέτα  $C_{sj}$ ,  $j \neq s$ . Όταν είναι σίγουρο ότι ένας κόμβος ανήκει στη μικρότερη διαδρομή τότε η ετικέτα του γίνεται μόνιμη. Για να βρούμε τον πιο κοντινό κόμβο που είναι πιο κοντά στον αρχικό κόμβο βρίσκουμε τη μικρότερη από τις προσωρινές ετικέτες και την μετατρέπουμε σε μόνιμη. Από αυτό το σημείο ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται σε δύο στάδια μέχρι η ετικέτα του τελικού κόμβου να γίνει μόνιμη.

1. Αναζητώ τους κόμβους που απέμειναν με προσωρινή ετικέτα. Συγκρίνω κάθε προσωρινή ετικέτα με το άθροισμα της τελευταίας μόνιμης ετικέτας και της απευθείας απόστασης του κόμβου, με την προσωρινή ετικέτα, από τον υπό εξέταση κόμβο. Η ελάχιστη από τις αποστάσεις γίνεται μόνιμη για τον συγκεκριμένο κόμβο.
2. Διαλέγω την μικρότερη εναπομένουσα ετικέτα και την μετατρέπω σε μόνιμη. Αν η ετικέτα του κόμβου τερματισμού γίνει μόνιμη ο αλγόριθμος λαμβάνει τέλος διαφορετικά επιστρέφω στο βήμα 1 (Anon., n.d.) (Γκαβογιάννης Λάμπρος, 2017)).

### 2.3 Βήματα Αλγορίθμου

Μια περισσότερο τυποποιημένη περιγραφή του αλγορίθμου είναι αυτή που ακολουθεί παρακάτω, η οποία δείχνει τη λειτουργία του αλγορίθμου σε βήματα. Αφού θέσουμε τον αρχικό κόμβο ο οποίος θα είναι και το σημείο εκκίνησης.



Παναγιώτης Αγαθοκλέους, Χάρης Κάποντας,  
“Θαλάσσιος κυματισμός και μοντέλα προσδιορισμού βέλτιστης  
διαδρομής πλοίου (Wave modeling and optimal routing models)”

1. Σημειώνουμε την απόσταση κάθε κόμβου ίση με άπειρο και ταυτόχρονα την απόσταση του κόμβου-αφετηρία ίση με μηδέν.
2. Θέτουμε ένα σύνολο  $A = \{Q\}$  όπου  $Q$  είναι όλοι οι κόμβοι που ο αλγόριθμος δεν έχει ακόμη επισκεφτεί. Έτσι το σύνολο  $A$  θα περιέχει όλους τους κόμβους του πλέγματος.
3. Για τον τρέχοντα κόμβο, εξετάζουμε όλους τους γειτονικούς του κόμβους και υπολογίζουμε το συνολικό άθροισμα απόστασής τους από τον αρχικό κόμβο. Συγκρίνουμε την καινούργια απόσταση με την προηγούμενη κι αν είναι μικρότερη, αντικαθιστούμε την παλιά με τη καινούργια. Για παράδειγμα, αν ο τρέχων κόμβος έχει απόσταση 7 από τον αρχικό και ο γειτονικός του τρέχοντος κόμβου, που εξετάζουμε αυτή τη στιγμή ο αλγόριθμος, έχει απόσταση 3 από τον τρέχοντα, το συνολικό άθροισμα απόστασης του γειτονικού από τον αρχικό κόμβο είναι  $7+3=10$ . Αν αυτή η απόσταση είναι μικρότερη από την ετικέτα απόστασης που είχε σημειωθεί, την αντικαθιστούμε με τη νέα υπολογισμένη τιμή και σημειώνουμε τον τρέχοντα κόμβο στην ετικέτα του προηγούμενου κόμβου.
4. Όταν τελειώσουμε με την εξέταση όλων των γειτονικών του τρέχοντος κόμβου, τον σημειώνουμε ως επεξεργασμένο και τον αφαιρούμε από το σύνολο  $A$ . Ένας επεξεργασμένος κόμβος δεν εξετάζεται ποτέ ξανά από τον αλγόριθμο. Η ετικέτα απόστασής της είναι η ελάχιστη και θα παραμείνει σταθερή.
5. Ο επόμενος τρέχων κόμβος θα είναι ο μη-επεξεργασμένος κόμβος με τη μικρότερη ετικέτα απόστασης.
6. Αν όλοι οι κόμβοι έχουν σημειωθεί ως επεξεργασμένοι, προχωράμε στο επόμενο βήμα. Διαφορετικά, συνεχίζουμε από το βήμα 3.
7. Ξεκινώντας από τον κόμβο-προορισμό (τερματικός κόμβος) εκτυπώνουμε τον κόμβο που αναγράφεται στην ετικέτα του προηγούμενου κόμβου. Επαναλαμβάνουμε μέχρι η ετικέτα του προηγούμενου κόμβου που θα συναντήσουμε να είναι άδεια.

Ο αλγόριθμος επιστρέφει τη συντομότερη διαδρομή ανάποδα, καθώς ξεκινά από τον προορισμό και εκτυπώνει κάθε φορά τον προηγούμενο. Είναι εύκολο όμως να

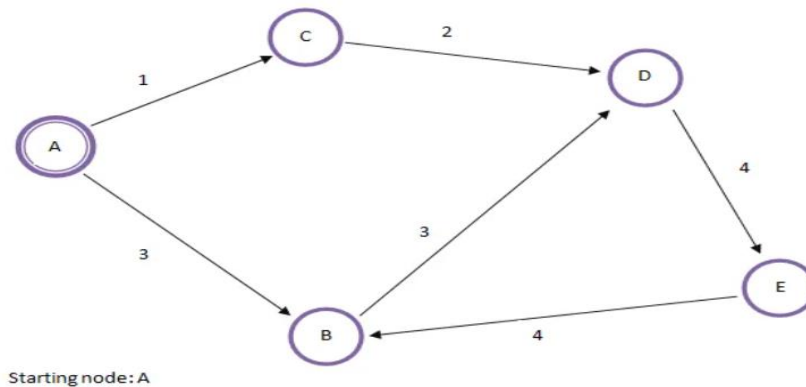


επεξεργαστεί κανείς κατάλληλα αυτή τη σειρά και να την αναποδογυρίσει, ώστε να λάβει τη σωστή διαδρομή( (Anon., n.d.) (John Kleinberg, 2008)).

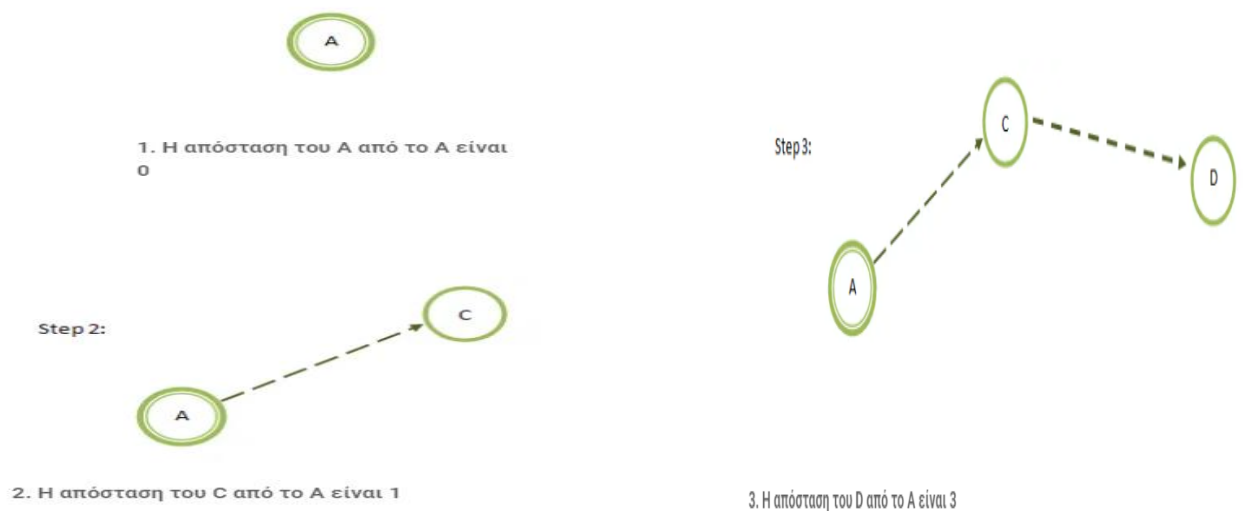
## 2.4 Παραδείγματα

### 2.4.1 Παράδειγμα απλής μορφής

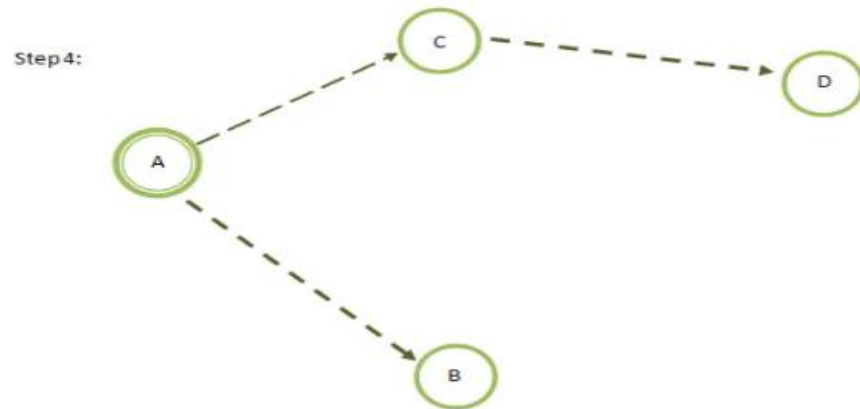
Με δεδομένο ένα γράφημα, υπολογίζουμε την ελάχιστη απόσταση όλων των κόμβων από το A ως κόμβο έναρξης. Ακολουθεί ένα απλό παράδειγμα του πως λειτουργεί ο αλγόριθμος Dijkstra. Παρακάτω φαίνεται βήμα προς βήμα η λύση του Αλγόριθμου Dijkstra.



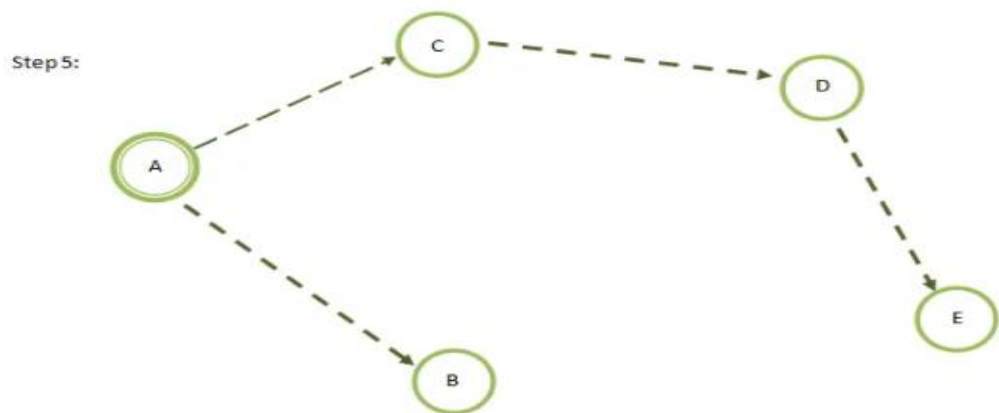
Εικόνα 1: Επίλυση του Αλγόριθμου Dijkstra αρχίζοντας από τον κόμβο A



Εικόνα 2 Βήματα 1-3 Επίλυσης Αλγόριθμου Dijkstra



4. Η απόσταση του B από το A είναι 3



5. Η απόσταση του E από το A είναι 7

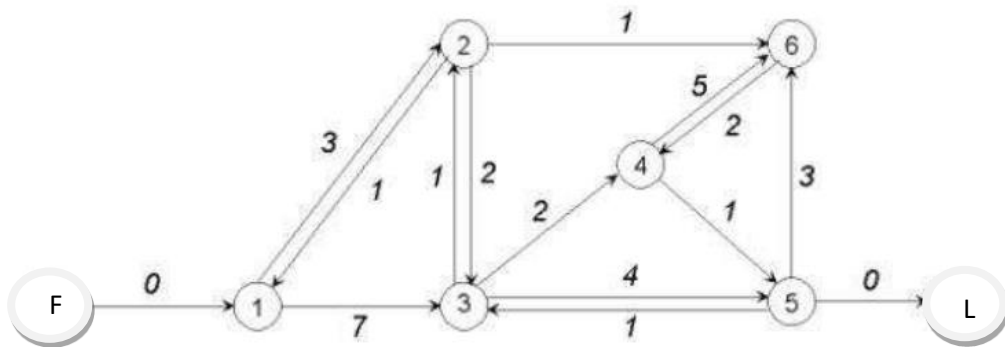
Εικόνα 3: Βήματα 3-5 Επίλυσης Αλγόριθμου Dijkstra

Πρώτα βρίσκουμε την απόσταση του A από το A που είναι μηδενική. Στη συνέχεια, βρίσκουμε την απόσταση του C από το A η οποία είναι 1. Βρίσκουμε την απόσταση του D από το A η οποία είναι 3. Μετά υπολογίζουμε την απόσταση του B από το A που είναι 3. Τέλος, βρίσκουμε την απόσταση του E από το A η οποία είναι 7 και έτσι καταλήγουμε στην βέλτιστη διαδρομή A-C-D-E (Αnon., 2021).



## 2.4.2 Παράδειγμα δικτύου

Ο σκοπός του παραδείγματος που ακολουθεί είναι η εφαρμογή του αλγόριθμου Dijkstra στο δίκτυο που παρουσιάζεται πιο κάτω. Το F (First) παριστάνει τον κόμβο από τον οποίο αρχίζει η δρομολόγηση του πακέτου, L (Last) ο τελικός κόμβος άφιξης και  $c_{ij}$  είναι η χωρητικότητα των  $i,j$  συνδέσμων του δικτύου. Ξεκινώντας τον αλγόριθμο δίνει μόνιμη ετικέτα  $r_f=0$  του κόμβου F και προσωρινές ετικέτες  $d_j=c_{fj}$ ,  $j=1,2,3,\dots,6,L$ . Αυτό σημαίνει  $d_1=0$ . Ο κόμβος 1 λαμβάνει μόνιμη ετικέτα μηδέν αφού  $d_1=0$  είναι η μικρότερη ετικέτα από τις προσωρινές ετικέτες (Γκαβογιάννης Λάμπρος, 2017).



Εικόνα 4: Παράδειγμα Δικτύου Εφαρμογής Αλγόριθμου Dijkstra

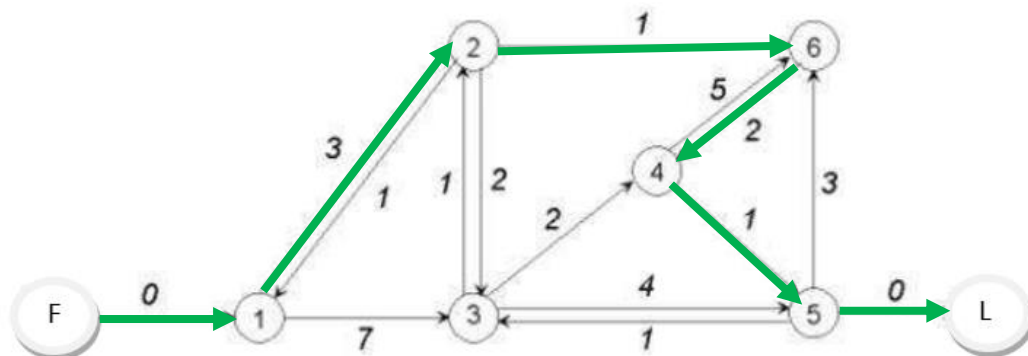
Οι κόμβοι 2 και 3 συνδέονται απευθείας με τον 1, που είναι ο τελευταίος κόμβος που απέκτησε μόνιμη ετικέτα. Σημειώνεται ότι  $(d_1+C_{12}=0+3) < (d_1+C_{13}=0+7)$ , επομένως οι προσωρινές ετικέτες των κόμβων 2 και 3 γίνονται  $d_2=3$  και  $d_3=7$  αντίστοιχα. Αφού  $d_2 < d_3$  η ετικέτα του κόμβου 2 γίνεται μόνιμη,  $r_2=3$ . Οι κόμβοι 3 και 6 συνδέονται απευθείας με τον 2. Ακόμα  $d_2+C_{23}=3+2=5 < 7$  και  $d_2+C_{26}=3+1=4$ . Συνεπώς έχουμε  $d_3=5$  και  $d_6=4$ . Η ετικέτα του κόμβου 6 γίνεται μόνιμη επειδή  $d_6 < d_3$ , άρα  $r_6=4$ . Ο τελευταίος κόμβος στον οποίο δόθηκε μόνιμη ετικέτα είναι ο 6ος ο οποίος συνδέεται απευθείας μόνο με τον 4. Ισχύει ότι  $d_6+c_{64}=4+2=6$ , άρα  $d_4=6$ . Τώρα επειδή οι μόνιμες ετικέτες που απέμειναν είναι οι  $d_3=5$ ,  $d_4=6$ ,  $d_5=d_F=7$  προκύπτει ότι  $d_3=\min\{d_3,d_4,d_5,d_6\}$  έτσι ο κόμβος 3 μονιμοποιείται και παίρνει τιμή  $r_3=5$ . Ακολουθώντας αυτή τη διαδικασία περατώνεται το πρόβλημα αφού ο κόμβος L πάρει μόνιμη ετικέτα (Γκαβογιάννης Λάμπρος, 2017).



Βήμα	Κόμβοι	s	1	2	3	4	5	6	T
0		0	.	.	.	.	.	.	.
1		0	0	.	.	.	.	.	.
2		0	0	.	.	.	.	.	.
3		0	0	3	7	.	.	.	.
4		0	0	3	7	.	.	.	.
5		0	0	3	5	.	.	4	.
6		0	0	3	5	.	.	4	.
7		0	0	3	5	6	.	4	.
8		0	0	3	5	6	.	4	.
9		0	0	3	5	6	9	4	.
10		0	0	3	5	6	9	4	.
11		0	0	3	5	6	7	4	.
12		0	0	3	5	6	7	4	.
13		0	0	3	5	6	7	4	7
14		0	0	3	5	6	7	4	7

Πίνακας 1: Υπολογισμοί για την εύρεση Βέλτιστης διαδρομής

Στον παραπάνω πίνακα βλέπουμε τους υπολογισμούς που έγιναν για το παράδειγμα του Αλγόριθμου Dijkstra. Συγκεκριμένα με μαύρο χρώμα δείχνουμε τις προσωρινές ετικέτες και με κόκκινο τις μόνιμες. Ο τρόπος που βρίσκουμε την διαδρομή που πρέπει τελικά να ακολουθήσουμε για να πάρουμε την βέλτιστη δρομολόγηση λαμβάνουμε υπόψη ότι  $iL=7$  που αυτό σημαίνει ότι η συντομότερη διαδρομή είναι με 7 μονάδες. Στο σημείο αυτό ελέγχουμε ότι ισχύει  $t_j=c_{ij}+t_i$  ώστε οι κόμβοι που θα επιλεγούν να είναι μέσα στη διαδρομή, ξεκινώντας από τον τελικό κόμβο L. Όταν βρούμε τον κόμβο μέσω του οποίου πάμε στον L, τότε επαναλαμβάνουμε την διαδικασία μέχρι να φτάσουμε στον αρχικό κόμβο F (Γκαβογιάννης Λάμπρος, 2017).



Εικόνα 5: Βέλτιστη διαδρομή στο δίκτυο



Παναγιώτης Αγαθοκλέους, Χάρης Κάποντας,  
“Θαλάσσιος κυματισμός και μοντέλα προσδιορισμού βέλτιστης  
διαδρομής πλοίου (Wave modeling and optimal routing models)”

## 2.5 Τροποποιημένος Αλγόριθμος Dijkstra

Ο αλγόριθμος Dijkstra μπορεί να τροποποιηθεί, ώστε να τερματίζει ακριβώς μόλις βρει την βέλτιστη διαδρομή προς τον κόμβο προορισμού. Η δρομολόγηση καιρού του πλοίου σχετίζεται με τη βελτιστοποίηση πολλών παραγόντων, δηλαδή με την ελάχιστη διέλευση χρόνου, την ελάχιστη κατανάλωση καυσίμου, την ελάχιστη δομική ζημιά του πλοίου και ούτω καθεξής. Αυτοί οι παράγοντες σχετίζονται με τη μείωση της ταχύτητας που περιλαμβάνει την ακούσια και την εκούσια μείωση ταχύτητας. Ο τροποποιημένος αλγόριθμος Dijkstra (improved Dijkstra algorithm) μπορεί να βρει την βέλτιστη διαδρομή σε συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες, εν τω μεταξύ, λόγω των βελτιωμένων μεθόδων, μπορεί επίσης να λειτουργεί με καλύτερη απόδοση. Τα αποτελέσματα του βελτιωμένου αλγορίθμου δείχνουν ότι μπορεί να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα της αναζήτησης και της εύρεσης μίας βέλτιστης διαδρομής σε παγκόσμιο επίπεδο (Xianming Zhu & Hongbo Wang, 2016).

Ο τροποποιημένος αλγόριθμος Dijkstra απαιτεί περισσότερο χρόνο και χώρο για να εκτελεστεί σε σχέση με τους αλγόριθμους ευριστικής αναζήτησης (Σομπόνης, 2012).

## 2.6 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Σε πρώτη φάση παρουσιάζονται τα σημεία στα οποία πλεονεκτεί ο Αλγόριθμος Dijkstra. Κατά την χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης παρατηρήθηκε ότι εξάγει ικανοποιητικά αποτελέσματα χωρίς να αντιμετωπίζει προβλήματα στην αποφυγή της στεριάς. (Βογιατζόγλου, n.d.) Για σχετικά μικρές διαδρομές δεν χρειάζεται μεγάλο χρόνο υπολογισμού. Επιπρόσθετα, το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του αλγορίθμου Dijkstra είναι η απλότητα χρησιμοποίησής του. Η εισαγωγή αλλά και εξαγωγή δεδομένων είναι απλούστερη και πιο εύχρηστη σε σχέση με άλλες μεθόδους εύρεσης της βέλτιστης δρομολόγησης των πλοίων.

Ωστόσο, κατά τη μελέτη του αλγορίθμου παρατηρήθηκαν και κάποια μειονεκτήματα με ένα από τα βασικότερα να είναι ότι οι καιρικές συνθήκες δεν αλλάζουν κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Όταν αυτό συμβαίνει ο αλγόριθμος θα πρέπει να τρέξει εξ' αρχής και να λάβει σαν σημείο αφετηρίας το σημείο που βρίσκεται το



πλοίο την παρούσα χρονική στιγμή. Η μέθοδος απαιτεί τη δημιουργία πλέγματος για την επεξεργασία των δεδομένων. Όσο πιο πυκνό αυτό το πλέγμα, τόσο καλύτερη και η τελική προσέγγιση της βέλτιστης διαδρομής. Όμως, όσο πιο πυκνό το πλέγμα τόσο η απαίτηση για υπολογιστικούς πόρους αυξάνεται εκθετικά. Ένα ακόμα μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν μπορούμε να μειώσουμε σκόπιμα την ταχύτητα του πλοίου (Θεόδωρος Καραχάλιος, 2017).

Επιπλέον, γνωρίζουμε ότι η βασική ιδιότητα που χρησιμοποιείται στο Dijkstra είναι η προσθήκη δύο θετικών αριθμών, επομένως, αυτός ο αλγόριθμος μπορεί να οδηγήσει σε λάθος απάντηση στην περίπτωση του γραφήματος που περιέχει αρνητικά άκρα. (Αnon., n.d.) Ο αλγόριθμος του Dijkstra υπολογίζει την ελάχιστη διαδρομή από ένα σημείο εκκίνησης σε όλα τα υπόλοιπα σημεία του πλέγματος. Η συγκεκριμένη διαδικασία μπορεί να είναι αρκετά χρονοβόρα σε υπολογιστικό χρόνο, γεγονός που αποτελεί ένα από τα βασικά μειονεκτήματα του συγκεκριμένου αλγόριθμου το ίδιο συναντάμε και σε μεγαλύτερες διαδρομές και ειδικά για πλέγμα μεγάλης πυκνότητας (Βογιατζόγλου, n.d.).

Ο (Mannarini et al., 2013), περιγράφει την ανάπτυξη ενός πρωτότυπου μοντέλου που στηρίζεται σε μια τροποποίηση του αλγορίθμου Dijkstra. Η μέθοδος λαμβάνει υπόψη μόνο το ύψος των κυμάτων, την περίοδο αιχμής, καθώς και την κατεύθυνση τους, μαζί με τους περιορισμούς ασφαλείας με βάση αυτές τις 136 παραμέτρους. Η μέθοδος δε κατά το στάδιο που περιγράφεται στο άρθρο ενημερώνει για τις εθελοντικές μειώσεις της ταχύτητας. Ο (Padhy et al., 2008) δίνει μια άλλη μέθοδο για τη δρομολόγηση χρησιμοποιώντας μια τροποποίηση του αλγορίθμου Dijkstra. Και σε αυτή τη μέθοδο η μείωση της ταχύτητας είναι επίσης δυνατή. Η μέθοδος λαμβάνει υπόψη την επιρροή που έχουν τα καιρικά φαινόμενα σε σχέση με την ταχύτητα του πλοίου και μπορεί επίσης να χειριστεί τις ζώνες περιορισμένης πρόσβασης, όπως η γη, μέσω της αλλαγής των βαρών των άκρων (Θεόδωρος Καραχάλιος, 2017).





Παναγιώτης Αγαθοκλέους, Χάρης Κάποντας,  
“Θαλάσσιος κυματισμός και μοντέλα προσδιορισμού βέλτιστης  
διαδρομής πλοίου (Wave modeling and optimal routing models)”

## 2.7 Ψευδόγλωσσα του Αλγόριθμου

Παρακάτω απεικονίζεται η μορφή του αλγόριθμου σε ψευδόγλωσσα στη C++.

```
function Dijkstra(Graph, source):
  for each vertex v in Graph: // Initializations
    dist[v] := infinity;
    previous[v] := undefined;
  end for;
  dist[source] := 0;
  Q := the set of all nodes in Graph; // All nodes in the graph are unoptimized - thus are in Q
  while Q is not empty:
    u := vertex in Q with smallest distance in dist[];
    if dist[u] = infinity:
      break;
    end if;
    remove u from Q;
    for each neighbor v of u: // where v has not yet been removed from Q.
      alt := dist[u] + dist_between(u, v);
      if alt < dist[v]:
        dist[v] := alt;
        previous[v] := u;
        decrease-key v in Q;
      end if;
    end for;
  end while;
```

Εικόνα 6: Ο αλγόριθμος Dijkstra στη C++

Εναλλακτικά στη MATLAB:

```
%-----
% Dijkstra Algorithm
% usage
% [cost rute] = dijkstra(Graph, source, destination)
%
% example
% G = [0 3 9 0 0 0 0;
%      0 0 0 7 1 0 0;
%      0 2 0 7 0 0 0;
%      0 0 0 0 0 2 8;
%      0 0 4 5 0 9 0;
%      0 0 0 0 0 0 4;
%      0 0 0 0 0 0 0;
%      ];
% [e L] = dijkstra(G,1,7)
%-----
function [e L] = dijkstra(A,s,d)
if s==d
    e=0;
    L=[s];
else
A = setupgraph(A,inf,1);
```



Παναγιώτης Αγαθοκλέους, Χάρης Κάποντας,  
“Θαλάσσιος κυματισμός και μοντέλα προσδιορισμού βέλτιστης  
διαδρομής πλοίου (Wave modeling and optimal routing models)”

```
if d==1
    d=s;
end
A=exchangemode(A,1,s);
lengthA=size(A,1);
W=zeros(lengthA);
for i=2 : lengthA
    W(1,i)=i;
    W(2,i)=A(1,i);
end
for i=1 : lengthA
    D(i,1)=A(1,i);
    D(i,2)=i;
end
D2=D(2:length(D),:);
L=2;
while L<=(size(W,1)-1)
    L=L+1;
    D2=sortrows(D2,1);
    k=D2(1,2);
    W(L,1)=k;
    D2(1,:)=[];
    for i=1 : size(D2,1)
        if D(D2(i,2),1)>(D(k,1)+A(k,D2(i,2)))
            D(D2(i,2),1) = D(k,1)+A(k,D2(i,2));
            D2(i,1) = D(D2(i,2),1);
        end
    end
end

for i=2 : length(A)
    W(L,i)=D(i,1);
end
end
if d==s
    L=[1];
else
    L=[d];
end
e=W(size(W,1),d);
L = listdijkstra(L,W,s,d);
end
```

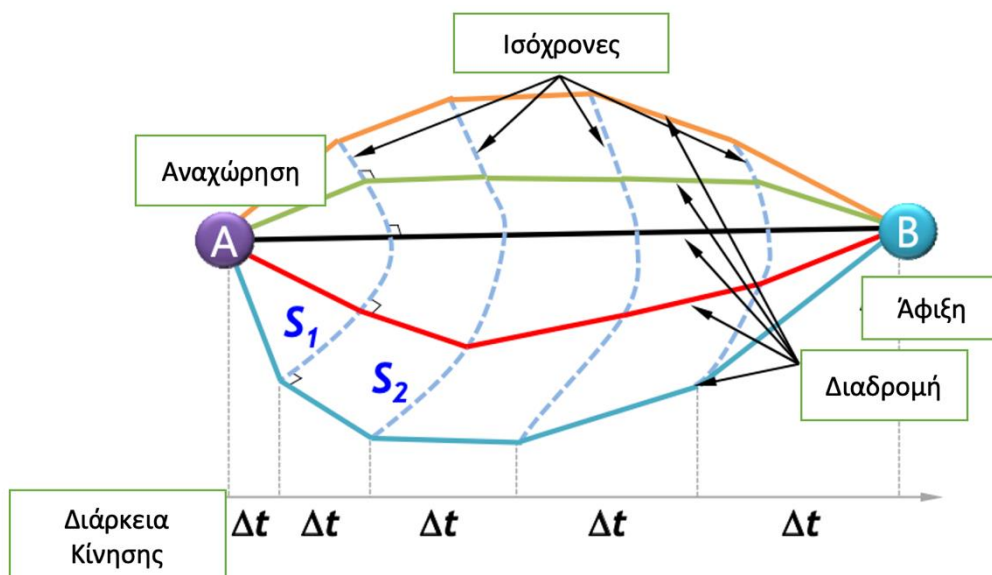
Εικόνα 7: Ο αλγόριθμος Dijkstra στη Matlab



### 3. Ισόχρονη Μέθοδος

#### 3.1 Περιγραφή

Η μέθοδος ισόχρονης προτάθηκε για χειροκίνητη χρήση από έναν πλοηγό για το σχεδιασμό διαδρομής. Ο ισόχρονος είναι ένα σύνολο συνδεδεμένων σημείων στα οποία μπορεί να φτάσει ένα πλοίο μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό όριο ξεκινώντας από ένα σημείο και πηγαίνοντας προς όλες τις πιθανές κατευθύνσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 4. Τα σημεία εξαρτώνται από την απόδοση του πλοίου ανάλογα με την κατάσταση της θάλασσας. Η πρώτη ισόχρονη (S1) δείχνει πιθανές διαδρομές για ένα δεδομένο χρονικό όριο από το σημείο αναχώρησης. Από κάθε σημείο που ανήκει στο S1, καθορίζεται μια κάθετη γραμμή σε μια εφαπτομένη προκειμένου να σχεδιαστεί η δεύτερη ισόχρονη (S2). Ένα τμήμα της γραμμής που αντιπροσωπεύει την απόσταση που μπορεί να φτάσει το πλοίο μέσα στο επόμενο χρονικό όριο ορίζει ένα σημείο στο S2. Ένα σύνολο τέτοιων συνδεδεμένων σημείων σχηματίζει S2. Οι επόμενοι ισόχρονες (S3, S4, ...) παράγονται παρόμοια.



Εικόνα 8: Γενική εικόνα της Ισόχρονης Μεθόδου



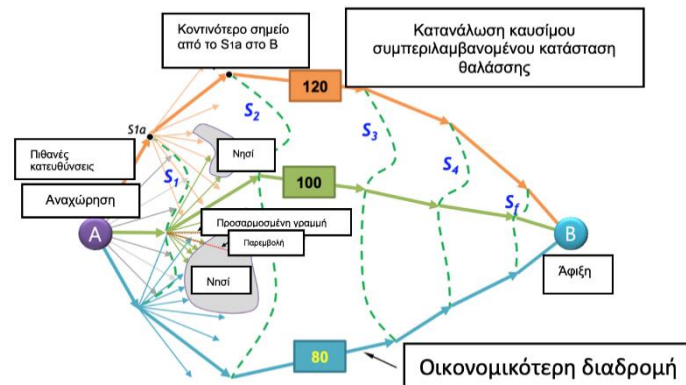
### 3.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Μεθόδου

Η μέθοδος ισόχρονης που προτάθηκε από τον Τζέιμς (1957) είναι μια πρακτική ντετερμινιστική μέθοδος με την οποία επιτυγχάνεται η ελάχιστη χρονική διαδρομή μέσω των διαφορετικών πορειών των πλοίων, λαμβάνοντας σταθερή ισχύ κινητήρα. Είναι πρακτικό με την έννοια ότι η λύση καθορίζεται με το χέρι (Laura WALTHER, n.d.).

Όσον αφορά τα μειονεκτήματα της μεθόδου ισόχρονης μπορεί να καθορίσει μια οικονομική διαδρομή ναυτιλίας σε σύντομο χρονικό διάστημα με ευκολία, υπάρχουν δυσκολίες στην εφαρμογή της σε πολύπλοκες θαλάσσιες περιοχές. Υπάρχουν δύο βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου. Το πρώτο είναι ότι αυτή η μέθοδος είναι δύσκολο να εφαρμοστεί στον προσδιορισμό μιας οικονομικής ναυτιλιακής διαδρομής με εμπόδια όπως τα νησιά. Η μέθοδος δεν λαμβάνει υπόψη παρεμβολές μεταξύ ισοχρόνων και νησιών. Το δεύτερο είναι γνωστό ως «βρόχος ισόχρονης». Ένας τέτοιος βρόχος είναι μια παρατυπία στο σχήμα ισόχρονης που προκαλείται από τη μη κυρτότητα της απόδοσης ενός πλοίου για μια δεδομένη θαλάσσια κατάσταση. Οι βρόχοι ισόχρονης διαδίδονται με τον αριθμό των ισοχρόνων και καθιστούν τη διαδικασία ανεφάρμοστη για τον καθορισμό μιας οικονομικής διαδρομής αποστολής ως αποτέλεσμα.

### 3.3 Βελτιωμένη Ισόχρονη Μέθοδος

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται μια μέθοδος που βελτιώνει την υπάρχουσα μέθοδο ισόχρονης. Για να λυθεί το πρώτο μειονέκτημα, πραγματοποιείται ένας έλεγχος παρεμβολών μεταξύ των ισοχρόνων και των νησιών, ενώ καθορίζεται ένα σύνολο συνδεδεμένων σημείων για την επόμενη ισόχρονη. Για να λυθεί το δεύτερο μειονέκτημα, ένα τμήμα της γραμμής που αντιπροσωπεύει την απόσταση που μπορεί να φτάσει το πλοίο μέσα στο επόμενο χρονικό όριο δεν είναι σταθερό στην κάθετη στην εφαπτομένη της ισόχρονης. Ο συνολικός αλγόριθμος της προτεινόμενης μεθόδου έχει ως εξής. Το σχήμα 5 δείχνει ένα παράδειγμα καθορισμού μιας οικονομικής διαδρομής πλοίου της οποίας η κατανάλωση καυσίμου είναι η χαμηλότερη από το σημείο εκκίνησης έως το σημείο άφιξης.



Εικόνα 9: Παράδειγμα προσδιορισμού μιας οικονομικής διαδρομής χρησιμοποιώντας την βελτιωμένη ισόχρονη μέθοδο

(1) Βήμα 1: σχεδιάστε ισόχρονες  $S_1$  συνδέοντας σημεία στα οποία μπορείτε να φτάσετε εντός συγκεκριμένου χρονικού ορίου, αφού λάβετε υπόψη τα εμπόδια μέσω ελέγχου παρεμβολών και τη θαλάσσια κατάσταση από το σημείο αναχώρησης (A) σε κάθε κατεύθυνση που καθορίζεται από τον χρήστη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που υπάρχουν εμπόδια όπως η ξηρά και ένα νησί προς την ισχύουσα κατεύθυνση, δεν είναι δυνατή η μετάβαση προς την κατεύθυνση. Στη συνέχεια, η απόσταση που μπορεί να επιτευχθεί εντός του χρονικού ορίου σύμφωνα με την κατάσταση της θάλασσας καθορίζεται λαμβάνοντας υπόψη τη μείωση της ταχύτητας του πλοίου και τη διόρθωσή του.

(2) Βήμα 2: βρείτε ένα σημείο του οποίου η απόσταση μέχρι το σημείο άφιξης (B) είναι η μικρότερη μεταξύ των σημείων που μπορούν να επιτευχθούν εντός του δεδομένου χρονικού ορίου σε κάθε κατεύθυνση από κάθε σημείο στους ισόχρονους  $S_1$  και, στη συνέχεια, κάντε  $S_2$  συνδέοντάς τα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5, κάποιες γραμμές για τη δεδομένη κατεύθυνση παρεμβαίνουν από ένα νησί. Αυτές οι γραμμές προσαρμόζονται και συρρικνώνονται μέσω υπολογισμού διατομής (συνισταμένη).

(3) Βήμα 3: σχεδιάστε ισόχρονες επαναλαμβάνοντας το βήμα 2. Μέσω της επανάληψης των Βημάτων 2 και 3, μπορούν να γίνουν όλοι οι ισόχρονες του πρώτου έως της τελευταίου ισοχρόνου.



Παναγιώτης Αγαθοκλέους, Χάρης Κάπονας,  
“Θαλάσσιος κυματισμός και μοντέλα προσδιορισμού βέλτιστης  
διαδρομής πλοίου (*Wave modeling and optimal routing models*)”

(4) Βήμα 4: συνδέστε τα σημεία στο Sf, της τελευταίας ισοχρόνου και του σημείου άφιξης.

(5) Βήμα 5: υπολογίστε την κατανάλωση καυσίμου σύμφωνα με τις διαδρομές και, στη συνέχεια, καθορίστε τη διαδρομή της οποίας η κατανάλωση καυσίμου είναι η χαμηλότερη, άρα και η πιο οικονομική (Roh, 2013).



## 4. Πρακτικές εφαρμογές βέλτιστης δρομολόγησης πλοίων

### 4.1 Βέλτιστη δρομολόγηση πλοίου με τη χρήση του τρισδιάστατου αλγόριθμου Dijkstra

#### 4.1.1 Στοιχεία πλοίου μεταφοράς E/K

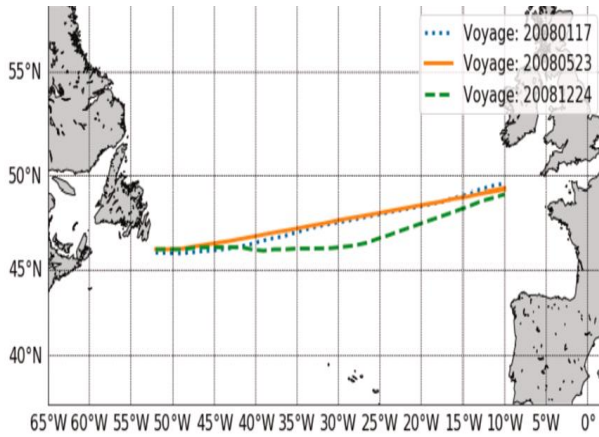
- 2800 TEU
- Συνολικό μήκος:245 μ
- Μήκος μεταξύ καθέτων:232 μ
- Πλάτος:32 μ
- Κοίλο η ύψος κατασκευής:19 μ
- Έμφορτο βύθισμα:10.78 μ
- Συντελεστής εκτοπίσματος:0,685
- Νεκρό βάρος:40900 tn
- Ταχύτητα υπηρεσίας:21 knots (υπό κανονικές συνθήκες καιρικές και φορτίου)

#### 4.1.2 Στοιχεία δρομολογίου

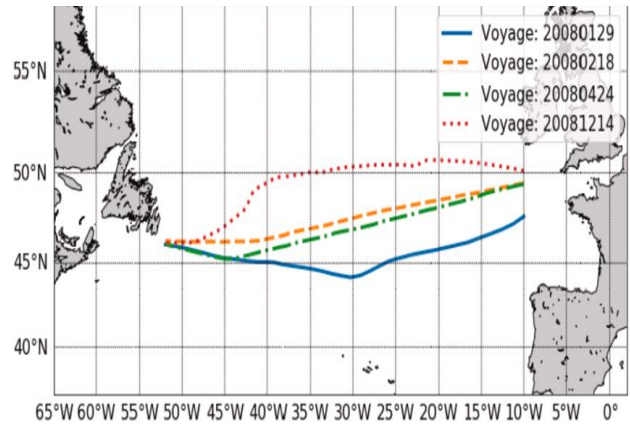
Προκειμένου να αποδειχθεί η ικανότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου του 3D Dijkstra για προβλήματα βελτιστοποίησης δρομολόγησης πλοίων, ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων 2800TEU που πλέει στον Βόρειο Ατλαντικό λαμβάνεται ως πλοίο μελέτης περιπτώσεων. Στις μετρήσεις περιλαμβάνονται τόσο δρομολόγια προς ανατολικά όσο και δυτικά για χειμερινές και ανοιξιάτικες πλεύσεις. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο πλοίο εγκαταστάθηκε επίσης ένα παλιό σύστημα βελτιστοποίησης πλου 2D ταξιδιού στο πλοίο. Το πραγματικό κόστος πλεύσης και καυσίμου ήταν ένας συνδυασμός υπηρεσιών σχεδιασμού ταξιδιού και εμπειριών καπετάνιων σχετικά με την πλοήγηση σε αυτήν την περιοχή. Αυτές οι πληροφορίες θα ληφθούν για να διερευνηθούν τα πιθανά οφέλη που μπορούν να επιτευχθούν από τον προτεινόμενο αλγόριθμο του 3D Dijkstra. Αυτή η εφαρμογή επικεντρώνεται στην επίδειξη της ικανότητας του προτεινόμενου αλγορίθμου βελτιστοποίησης για την



διαδρομή με την ελάχιστη κατανάλωση καυσίμου ως στόχο και τη διατήρηση της ίδιας χρονικής διάρκειας με τα ταξίδια μέτρησης.



Εικόνα 11: Ταξίδια με Ανατολική Πλεύση



Εικόνα 10: Ταξίδια με Δυτική Πλεύση

Προκειμένου να εξακριβωθεί το όφελος του προτεινόμενου αλγορίθμου βελτιστοποίησης ταξιδιού, χρησιμοποιούνται τέσσερις μέθοδοι προγραμματισμού ταξιδιού για τη σύγκριση, η ορθοδρομική πλεύση ή ορθοδρομία (great circle), η μετρημένη διαδρομή (που συνδυάζει τις εμπειρίες του καπετάνιου και ένα άγνωστο σύστημα βελτιστοποίησης ταξιδιού), ο συμβατικός αλγόριθμος 2D Dijkstra (2DDA) και ο τρέχοντας προτεινόμενος αλγόριθμος 3D Dijkstra (3DDA).

#### 4.1.3 Αποτελέσματα ταξιδιών με Ανατολική πλεύση

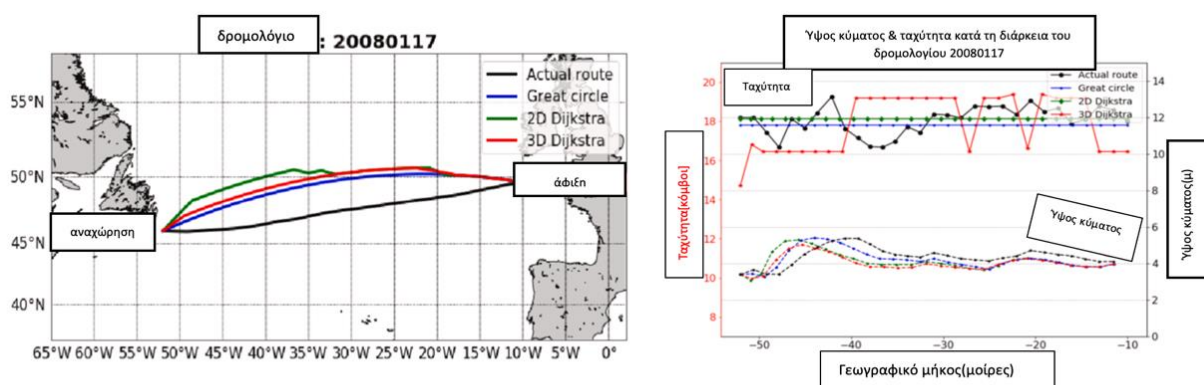
Αρ. Ταξιδιού	Μέθοδος	Εκτιμώμενος χρόνος Αφίξης	Κατανάλωση Καυσίμου[ton]	Απόσταση [χλμ]
20080117	Actual route	90.8	249.8	3193.6
	Great circle	90.6	235.8	3130.4
	2DDA	90.5	239.7	3186.8
	3DDA	91.0	230.6	3136.9
20080523	Actual route	88.7	229.0	3176.2
	Great circle	88.6	220.5	3127.2
	2DDA	88.8	221.7	3164.8
	3DDA	89.0	220.4	3135.3
20081224	Actual route	94.7	246.4	3238.8
	Great circle	94.6	218.6	3132.1
	2DDA	94.5	222.9	3196.9
	3DDA	94.5	216.7	3132.1

Πίνακας 2: Πίνακας Αποτελεσμάτων Ταξιδιών Ανατολικής Πλεύσης





Ωστόσο τα αποτελέσματα του πιο πάνω πίνακα δείχνουν σημαντική εξοικονόμηση καυσίμου με τη χρήση του 3DDA σε σύγκριση με τη πραγματική πλεύση ιδίως για τα χειμερινά ταξίδια. Ο πίνακας συγκρίνει την κατανάλωση καυσίμου και την απόσταση πλεύσης των διαδρομών που δημιουργούνται από τις τέσσερις μεθόδους σχεδιασμού και μας δείχνει ότι η μέθοδος 3DDA έχει μεγάλες δυνατότητες εξοικονόμησης καυσίμου έως και περίπου 12 % σε σύγκριση με τις πραγματικές πλεύσεις του πλοίου. Οι διαδρομές που δημιουργούνται με τη μέθοδο βελτιστοποίησης 2DDA μπορούν να βοηθήσουν στη μείωση κατά μέσο όρο περίπου 6% της κατανάλωσης καυσίμου από τις πραγματικές διαδρομές. Το υψηλότερο κόστος καυσίμου κατά μήκος των πραγματικών διαδρομών ενδέχεται να οφείλεται εν μέρει στις μεγάλες αποστάσεις πλεύσης.

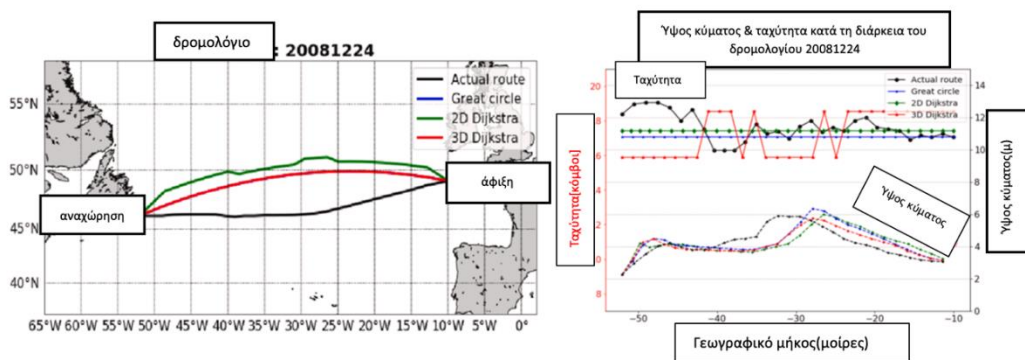


Εικόνα 12:Στοιχεία Ταξιδιού 20080117

Για το δρομολόγιο με αριθμό 20080117, παρατηρούμε ότι και οι 4 μέθοδοι διαφέρουν μεταξύ τους ειδικά στην αρχή των ταξιδιών. Η πορεία πλεύσης που δημιουργήθηκε με τη μέθοδο 2DDA πηγαίνει προς το βορειότερο και η πραγματική πλεύση ακολουθούσε απλώς τη λοξοδρομική πλεύση. Δεν υπάρχει σχεδόν καμία ακούσια μείωση ταχύτητας όταν χρησιμοποιείται η ορθοδρομία και η μέθοδος 2DDA. Η αρχική ταχύτητα για τη μέθοδο 2DDA είναι λίγο υψηλότερη από την ορθοδρομική πλεύση και η διαδρομή 2DDA σχετίζεται επίσης με μεγαλύτερη απόσταση πλεύσης, αλλά οι καταναλώσεις καυσίμου με αυτές τις δύο μεθόδους δεν διαφέρουν πολύ. Αυτό οφείλεται εν μέρει επειδή οι συνθήκες κυμάτων που συναντήθηκαν κατά μήκος των



διαδρομών κατά 2DDA είναι κατά μέσο όρο χαμηλότερες από τις μεγάλες διαδρομές. Επειδή το 3DDA μπορεί να προσαρμόσει την ταχύτητα του πλοίου (εθελοντική μείωση ταχύτητας) με βάση τις καιρικές συνθήκες και τις συνθήκες της θάλασσας, μπορεί να δημιουργήσει μια διαδρομή με τη μικρότερη κατανάλωση καυσίμου, αλλά να διατηρήσει την ίδια εκτιμώμενη ώρα άφιξης με τη μετρημένη.



Εικόνα 13:Στοιχεία Ταξιδίου 20081224

Για το δεύτερο δρομολόγιο με αριθμό 20081224 που φαίνεται στο πιο πάνω σχήμα, λόγω των σχετικά σκληρών θαλάσσιων συνθηκών που συναντήθηκαν κατά τη διάρκεια του ταξιδιού με μέγιστο ύψος κύματος περίπου 6 μέτρα, υπάρχουν μεγάλες διαφορές τόσο στην απόσταση πλεύσης όσο και στην κατανάλωση καυσίμου μεταξύ των διαδρομών που σχεδιάστηκαν με διαφορετικές μεθόδους. Η μέθοδος 2DDA μπορεί να δημιουργήσει διαδρομή με μεγαλύτερη απόσταση πλεύσης από την ορθοδρομική πλεύση, αλλά συνάντησε μέτριο θαλάσσιο περιβάλλον. Η βέλτιστη διαδρομή που δημιουργείται με τη μέθοδο 3DDA μπορεί να συνάδει με την ορθοδρομική πλεύση, αλλά η κατανάλωση καυσίμου είναι λίγο χαμηλότερη από αυτήν. Αυτό συμβαίνει επειδή η μέθοδος 3DDA μπορεί να προσαρμόσει την ταχύτητα ενός πλοίου ανάλογα με το θαλάσσιο περιβάλλον. Όπως φαίνεται στο δεξιό διάγραμμα του σχήματος, τα ύψη κύματος που συναντώνται με τη μέθοδο 3DDA είναι πάντα μικρότερα από την ορθοδρομική πλεύση.



#### 4.1.4 Αποτελέσματα ταξιδιών με Δυτική πλεύση

Αρ. Ταξιδιού	Μέθοδος	Εκτιμώμενος χρόνος Αφίξης	Κατανάλωση Καυσίμου[ton]	Απόσταση [χλμ]
20080129	Actual route	105.8	309.8	3354.2
	Great circle	105.6	304.5	3168.1
	2DDA	106.2	301.2	3429.2
	3DDA	106.0	286.2	3270.9
20080218	Actual route	94.5	280.7	3191
	Great circle	94.5	272.0	3121.3
	2DDA	94.4	275.1	3196.5
	3DDA	94.5	269.0	3142.0
20080424	Actual route	92.5	314.3	3244.0
	Great circle	92.5	246.1	3129.9
	2DDA	93.2	245.7	3241.8
	3DDA	92.5	243.8	3136.4
20081214	Actual route	104.8	301.7	3186.7
	Great circle	105.3	272.5	3114.5
	2DDA	104.5	278.2	3329.1
	3DDA	105.0	262.2	3193.4

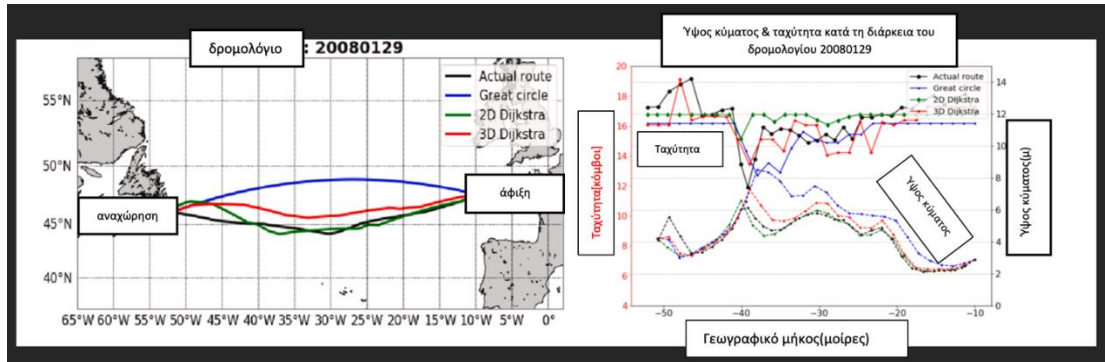
Πίνακας 3: Πίνακας Αποτελεσμάτων Ταξιδιών Δυτικής Πλεύσης

Για τα δρομολόγια με δυτικές πλεύσεις, είναι εξαιρετικά σημαντικό να σχεδιάζονται προσεκτικά οι διαδρομές ενός πλοίου. Ισχύει όχι μόνο για τον στόχο της μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου, ακόμη και για τα παλιά συμβατικά συστήματα βελτιστοποίησης ταξιδιών που ενδιαφέρονται περισσότερο για την ασφάλεια και τον χρόνο άφιξης ως στόχους κατά τη διάρκεια της πλεύσης(ή περιορισμούς). Τέσσερα μετρημένα ταξίδια πραγματοποιούνται για να επικυρώσουν τα οφέλη εξοικονόμησης καυσίμου χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μέθοδο 3DDA. Ο πιο πάνω πίνακας απαριθμεί τον εκτιμώμενο χρόνο άφιξης, την κατανάλωση καυσίμου και τις αποστάσεις πλεύσης για αυτές τις τέσσερις διαδρομές πλοίων. Για ένα δεδομένο χρόνο άφιξης, η προτεινόμενη μέθοδος 3DDA μπορεί πάντα να παρέχει μια διαδρομή με καλύτερα αποτελέσματα για εξοικονόμηση καυσίμου ως στόχο βελτιστοποίησης, δηλαδή, κατά μέσο όρο περίπου το 12% της εξοικονόμησης καυσίμου σε σύγκριση με την πραγματική πλεύση. Σε σύγκριση με μια συμβατική μέθοδο 2DDA, η μέθοδος



Παναγιώτης Αγαθοκλέους, Χάρης Κάποντας,  
“Θαλάσσιος κυματισμός και μοντέλα προσδιορισμού βέλτιστης  
διαδρομής πλοίου (Wave modeling and optimal routing models)”

3DDA μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου κατά περίπου 4%. Δεδομένου ότι τα ταξίδια προς τα δυτικά καταναλώνουν γενικά περισσότερα καύσιμα από τα δρομολόγια προς τα ανατολικά, το 3DDA μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη εξοικονόμηση καυσίμου.

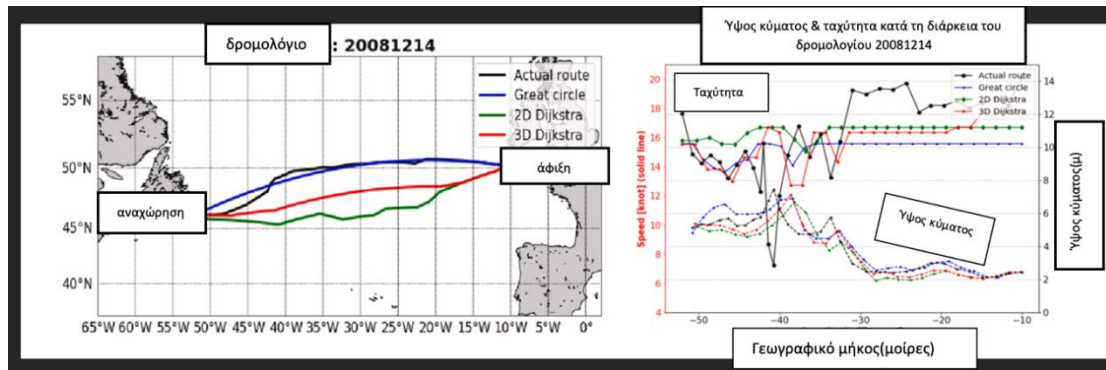


Εικόνα 14:Στοιχεία Ταξιδιού 20080129

Για το πρώτο χειμερινό ταξίδι 20080129, φαίνεται προφανώς ότι η πραγματική διαδρομή είχε σχεδιαστεί αρκετά σοβαρά, καθώς διαφέρει από τη ορθοδρομία και τη λοξοδρομία. Η πορεία της πραγματικής διαδρομής είναι παρόμοια με τη διαδρομή του 2DDA. Η μέθοδος 3DDA μπορεί να εξοικονομήσει περίπου 7% της κατανάλωσης καυσίμου λόγω του καλύτερου σχεδιασμού ταχύτητας. Υπονοεί επίσης ότι η μέθοδος 3DDA μπορεί να προσαρμόσει καλά την ταχύτητα του πλοίου ώστε να ικανοποιεί και σε πιο δυσμενείς συνθήκες θάλασσας. Οι ταχύτητες του πλοίου βελτιστοποιημένες από το 3DDA είναι οι χαμηλότερες στη μέση του ταξιδιού, όπου βρίσκεται κοντά στην καταγίδα. Για αυτό το ταξίδι, με τη ορθοδρομική πλεύση θα συναντήσει τις σκληρότερες συνθήκες της θάλασσας, δηλαδή το μέγιστο ύψος κύματος άνω των 8



μέτρων. Από άποψη ασφαλείας, η ορθοδρομική πλεύση με τη μικρότερη απόσταση δεν συνάδει με βελτιστοποιημένη πλεύση.



Εικόνα 15: Στοιχεία Ταξιδιού 20081214

Για το άλλο χειμερινό ταξίδι προς τη δύση με αριθμό 20081214, η πραγματική πλεύση είναι αρκετά κοντά στην ορθοδρομική πλεύση. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι ταχύτητες πλεύσης στην αρχή του ταξιδιού είναι σημαντικά υψηλότερες (μια συνηθισμένη στρατηγική πλοήγησης για γρήγορη πλεύση στην αρχή για να διασφαλιστεί ο εκτιμώμενος χρόνος άφιξης ενός πλοίου) από άλλες μεθόδους, καθώς και η ακούσια/εκούσια μείωση ταχύτητας στην τοποθεσία με γεωγραφικό μήκος κοντά στο  $-40^\circ$ , η κατανάλωση καυσίμου της πραγματικής πλεύσης είναι περίπου 10% υψηλότερη από τον την ορθοδρομική πλεύση. Από την άλλη πλευρά, παρόλο που τα θαλάσσια περιβάλλοντα που συναντήθηκαν κατά τη διαδρομή βελτιστοποιημένα με τη μέθοδο 3DDA είναι αρκετά παρόμοια με τη μέθοδο 2DDA και την ορθοδρομική πλεύση, η μέθοδος 3DDA δίνει τη χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου, δηλαδή περίπου 6% χαμηλότερη από την 2DDA μέθοδο και 15% χαμηλότερη από την πραγματική πλεύση. Επιβεβαιώνει και πάλι την ικανότητα σωστής ρύθμισης ταχύτητας με τη μέθοδο 3DDA για παγκόσμια βελτιστοποίηση ταξιδιού (Helong Wang, n.d.).

## 4.2 Διερεύνηση της βέλτιστης δρομολόγησης πλοίων στην Ανταρκτική με την βοήθεια του αλγόριθμου Dijkstra

Η πρόβλεψη μιας ασφαλούς διαδρομής για τη ναυτιλία είναι δύσκολη στον Ανταρκτικό Ωκεανό λόγω αβέβαιου καιρού και των δυναμικών συνθηκών του θαλάσσιου πάγου-ωκεανού. Επικρατούν αβέβαιες καιρικές συνθήκες καθώς αυτή η



Παναγιώτης Αγαθοκλέους, Χάρης Κάποντας,  
“Θαλάσσιος κυματισμός και μοντέλα προσδιορισμού βέλτιστης  
διαδρομής πλοίου (*Wave modeling and optimal routing models*)”

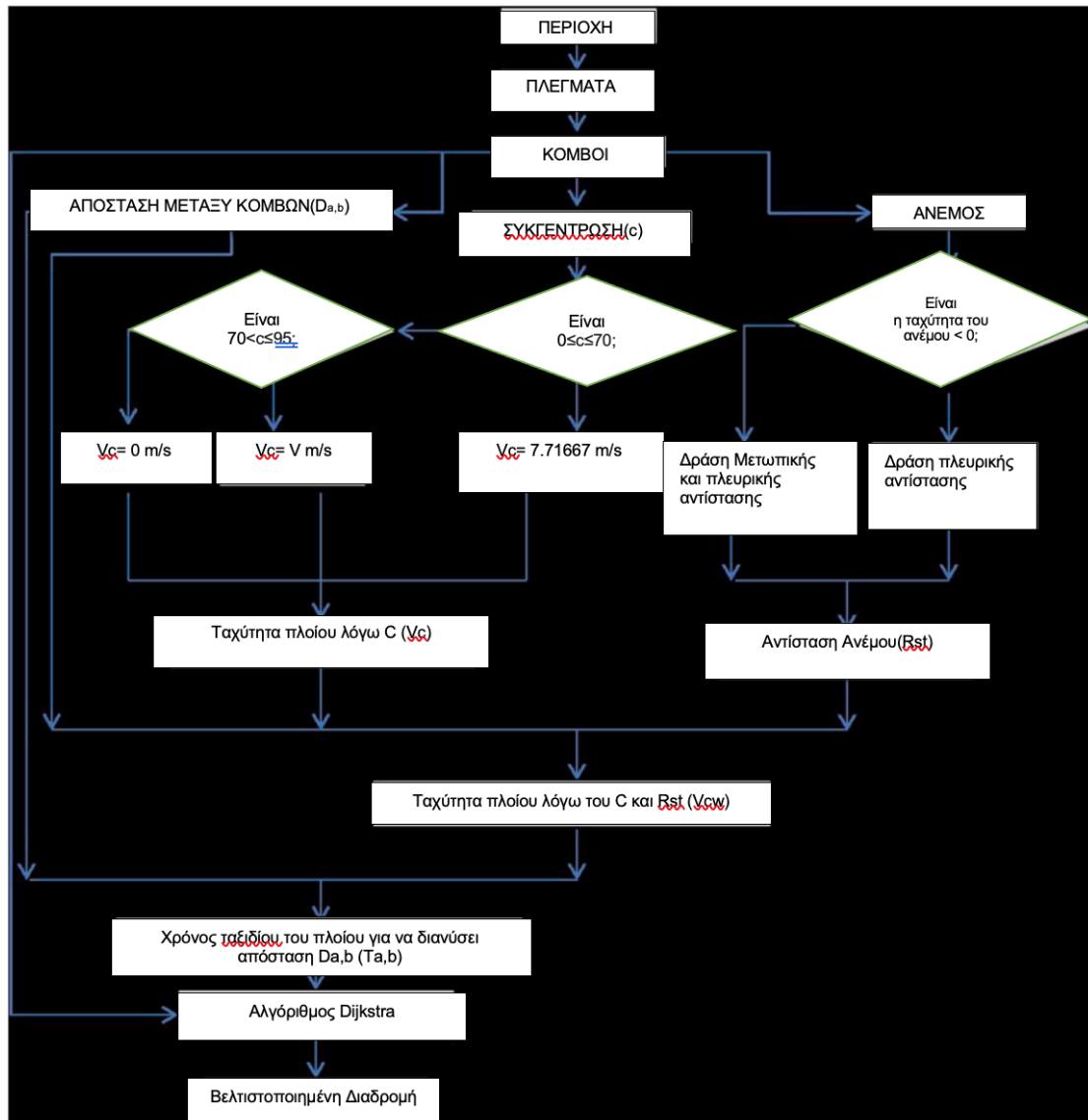
περιοχή είναι μάρτυρας συνεχούς ευρείας αλληλεπίδρασης μεταξύ των ατμοσφαιρικών παραμέτρων, των παραμέτρων του ωκεανού και παραμέτρους θαλάσσιου πάγου. Οι ατμοσφαιρικές παράμετροι περιλαμβάνουν την ταχύτητα του ανέμου (μέγεθος και κατεύθυνση), πίεση και θερμοκρασία.

Με βάση τη συγκεκριμένη μελέτη, διαμορφώνεται μια μαθηματική διαδρομή από το Μπαράτι στο Μαϊτρί (Ινδικοί ερευνητικοί σταθμοί στις Ακτές της Ανταρκτικής) μέσω διάφορων κόμβων με χρόνο ως βάρος που στη συνέχεια βελτιστοποιείται μέσω του αλγορίθμου του Dijkstra για να επιτευχθεί η βέλτιστη δρομολόγηση και να μπορεί να είναι χρήσιμη για να υποστηρίξει τη μελλοντική πλοήγηση πλοίων στον πάγο της Ανταρκτικής.

Στο πιο κάτω σχήμα, προτείνεται ένας αλγόριθμος για να επιτευχθεί η βέλτιστη θαλάσσια διαδρομή στον πάγο, καλύπτοντας περιοχές για κάθε πλοίο του οποίου οι διαστάσεις και η αποτελεσματικότητα παραμένουν τα επίπεδα να είναι γνωστά εκ των προτέρων. Παράμετροι θαλάσσιου πάγου όπως η συγκέντρωση, το πάχος και η έκταση με την ταχύτητα του ανέμου για την υπό μελέτη περιοχή χρησιμοποιούνται ως είσοδος για αυτόν τον αλγόριθμο. Προσφέρει ένα καθορισμένο σύνολο βημάτων για απόκτηση μιας βέλτιστης διαδρομής για οποιαδήποτε δύο σημεία σε συγκεκριμένες περιοχές που καλύπτονται από πάγο. Αρχίζει με τον καθορισμό πλεγμάτων και τον περαιτέρω προσδιορισμό κόμβων. Περαιτέρω, οι παράμετροι του πάγου και η ταχύτητα του ανέμου μελετώνται για να βρεθούν εφικτά μονοπάτια. Αυτοί οι παράμετροι χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της αντίστασης που χρησιμοποιείται με τη σειρά της για να υπολογιστεί η αναμενόμενη ταχύτητα σε κάθε κόμβο. Ο χρόνος ταξιδιού μεταξύ δύο κόμβων λαμβάνεται από την αναμενόμενη ταχύτητα που πραγματικά λειτουργούσε ως βάρος για το γράφημα κατευθυνόμενο από την πηγή στον προορισμό, το οποίο βελτιστοποιείται τελικά από τον γνωστό αλγόριθμο Dijkstra.



Παναγιώτης Αγαθοκλέους, Χάρης Κάπονας,  
“Θαλάσσιος κυματισμός και μοντέλα προσδιορισμού βέλτιστης  
διαδρομής πλοίου (Wave modeling and optimal routing models)”



Εικόνα 16: Αλγόριθμος επίτευξη της βέλτιστης θαλάσσιας διαδρομής στον πάγο

Στην προσπάθεια μελέτης διαφορετικών παραμέτρων που επηρεάζουν τη μετακίνηση πλοίων σε θαλάσσιες περιοχές πάγου, με την συγκεκριμένη μαθηματική μοντελοποίηση μπορούμε να βρούμε την ασφαλέστερη και βέλτιστη διαδρομή. Η διαδρομή που λαμβάνεται με αυτή τη μέθοδο είναι αξιόπιστη καθώς επικυρώνεται με το πραγματική πορεία του 33ου ISEA. Τα αποτελέσματα δείχνουν επίσης ότι μια μικρότερη παραλλαγή μπορεί να εξοικονομήσει σχεδόν 22,49 ώρες (σχεδόν μια μέρα). Παρατηρήσεις, τα αποτελέσματα και ο προτεινόμενος αλγόριθμος που έγιναν μπορούν να παρέχουν βοήθεια για πιο αξιόπιστη λήψη αποφάσεων. Τέλος, η διαδικασία αυτή μπορεί να φανεί χρήσιμη κατά τη διάρκεια μελλοντικών επιστημονικών αποστολών



Παναγιώτης Αγαθοκλέους, Χάρης Κάποντας,  
“Θαλάσσιος κυματισμός και μοντέλα προσδιορισμού βέλτιστης  
διαδρομής πλοίου (Wave modeling and optimal routing models)”

στην περιοχή πάγου της θάλασσας στην Ανταρκτική. Παρακάτω φαίνεται η εξοικονόμηση χρόνου όπως αναφέρεται και πιο πάνω κατά τις 20 με 26 Μαρτίου (149,90 ώρες) και ακολούθως κατά τον Φεβρουάριο μεταξύ 20 με 26 του μήνα αυτού (125,12 ώρες).

Διάρκεια	Αρχική Ημερομηνία	Τελική Ημερομηνία	Ημέρες
Μάρτιος (2019)	20 Μαρτίου	26 Μαρτίου	6,246(149,90 h)

Πίνακας 4: Χρόνος που πάρθηκε για προτεινόμενη διαδρομή για το Μάρτιο του 2019 αρχόμενη από την δεδομένη ημερομηνία



Εικόνα 17: Προτεινόμενη Διαδρομή για τον Μάρτιο 2019

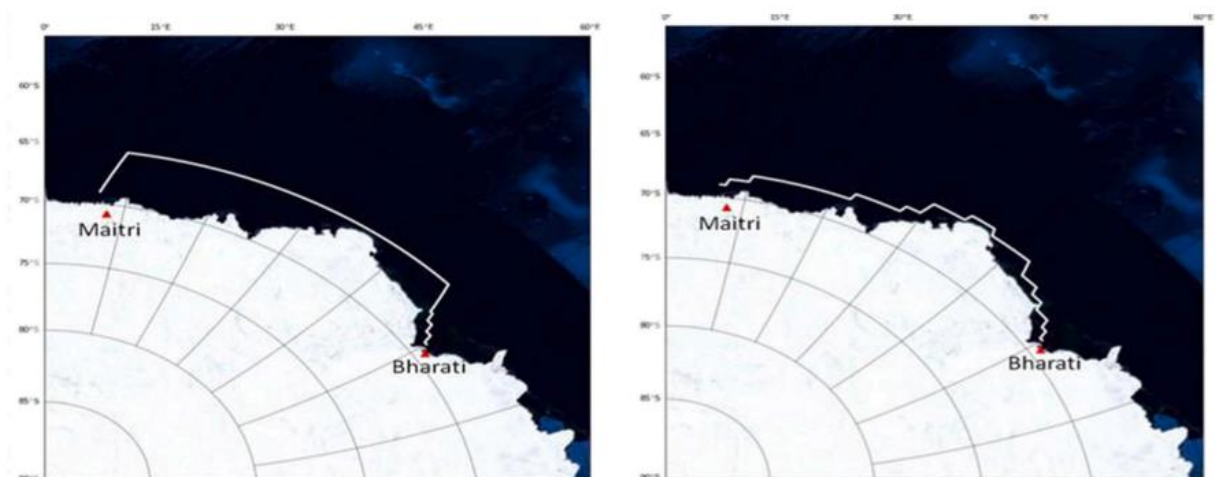


Fig. 8. Proposed route for Feb 2019, Left: feasible path, Right: Optimal path

Εικόνα 18: Προτεινόμενη Διαδρομή για Φεβρουάριο 2019 . Αριστερά : Εφικτή Διαδρομή, Δεξιά: Βέλτιστη Διαδρομή





Παναγιώτης Αγαθοκλέους, Χάρης Κάπονας,  
“Θαλάσσιος κυματισμός και μοντέλα προσδιορισμού βέλτιστης  
διαδρομής πλοίου (Wave modeling and optimal routing models)”

Duration	Starting Date	Final Date	No. of Days
February (2019)	20-February	25-February	5.46 (131.21 h)
February (2019) (Optimized Path)	20-February	25-February	5.21 (125.12 h)

Πίνακας 5: Χρόνος που πάρθηκε για 2 προτεινόμενες διαδρομές για τον Φεβρουάριο 2019 με αρχόμενες ημερομηνίες

### 4.3 Εφαρμογή της τρισδιάστατης τροποποιημένης ισόχρονης μεθόδου

Η μέθοδος 3DMI (Three-Dimensional Modified Isochrone Method) σύμφωνα με την συγκεκριμένη μελέτη των Yu-Hsien Lin και Ming-Chung Fang, χρησιμοποιεί το πλωτό πλέγμα-σύστημα για τον καθορισμό των χωρο χρονικών διατάξεων για τη βέλτιστη δρομολόγηση πλοίων. Στο πλωτό πλέγμα-σύστημα, οι καταστάσεις κάθε σταδίου είναι τρισδιάστατες, δηλαδή γεωγραφικές τοποθεσίες, ο χρόνος διέλευσης και η απόσταση μεταξύ των μονάδων γωνία πορείας από τη διαδρομή αναφοράς. Από το στιγμιαίο βάθος του νερού και τις καιρικές συνθήκες οι οποίες αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου, γεγονός που θα τροποποιήσει τις προγραμματισμένες διαδρομές στο ταξίδι αντίστοιχα. Κατά συνέπεια, θα πρέπει να υπάρχει δυνατότητα πλοήγησης μιας προγραμματισμένης διαδρομής με βάση τους περιορισμούς που αναλύονται δυναμικά σύμφωνα με τα ωκεάνια περιβάλλοντα. Από την άλλη πλευρά, εάν η ταχύτητα του πλοίου σε ήρεμα νερά υπερβαίνει την κρίσιμη ταχύτητα θα πρέπει επίσης να θεωρείται ως περιορισμός. Έτσι, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί μια σειρά από ευέλικτα ταξίδια σύμφωνα με τις συγκεκριμένες λειτουργίες των πλοίων με σεβασμό στα δυναμικά ωκεάνια περιβάλλοντα.

Προκειμένου να επικυρωθεί η απόδοση της προτεινόμενης 3DMI μεθόδου, πραγματοποιήθηκε μια σειρά προσομοιώσεων για τα υπερωκεάνια ταξίδια προς Ανατολή (eastbound) ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων 2.200 TEU. Για τα δρομολόγια με πορεία προς τα ανατολικά, το σημείο αναχώρησης είναι το Keelung City (25,15 °N, 121,75 °E) της Ταϊβάν, ενώ το σημείο προορισμού είναι το Σαν Φρανσίσκο (37,5 °N, 123 °W) των ΗΠΑ, και αντίστροφα.

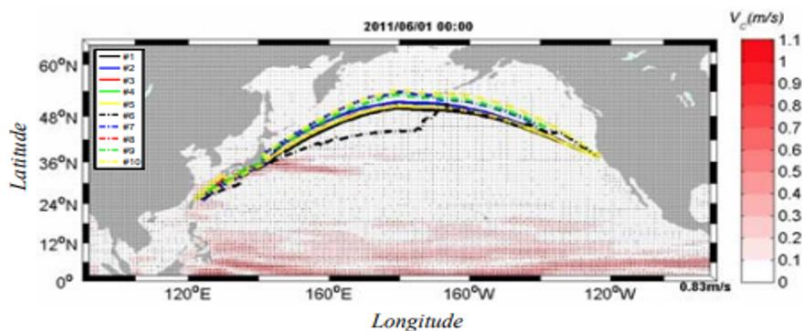
Μια σειρά περιπτώσεων που διεξήχθη εφαρμόζοντας διαφορετικά κριτήρια ταχύτητας για υπερωκεάνια ταξίδια δείχνει τα ίχνη διαδρομής διαφορετικών



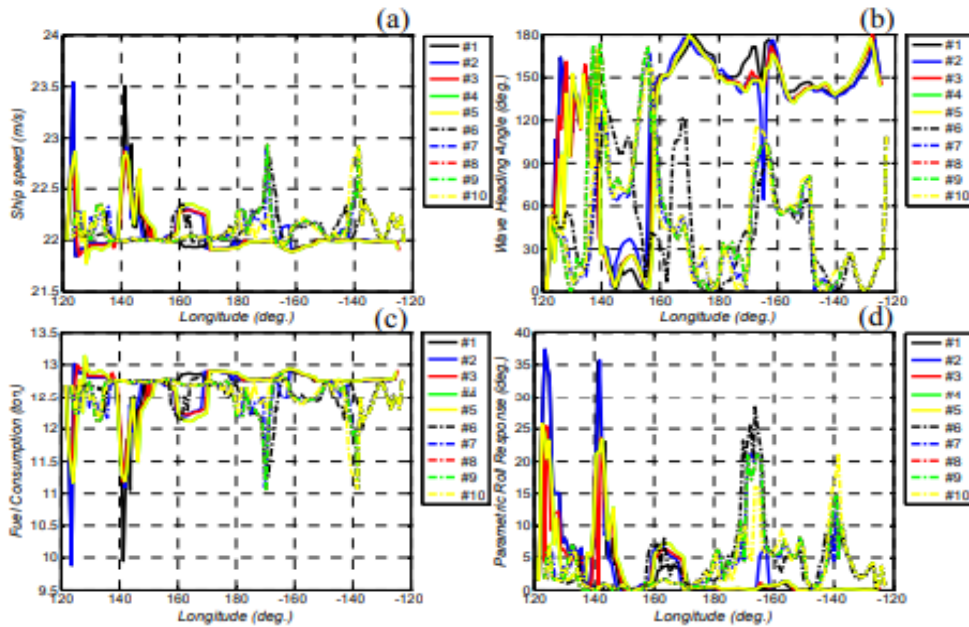
Παναγιώτης Αγαθοκλέους, Χάρης Κάπονας,  
 “Θαλάσσιος κυματισμός και μοντέλα προσδιορισμού βέλτιστης  
 διαδρομής πλοίου (Wave modeling and optimal routing models)”

περιπτώσεων στο τρέχον μοτίβο στο 0000Z την 01 Ιουνίου 2011. Η ανάλυση κατά χαρακτηριστικά διαδρομής δείχνει ότι η συμβολή της ελαχιστοποιημένης κατανάλωσης καυσίμου στα δρομολόγια είναι πολύ καλύτερα σε τρέχοντα ταξίδια παρά σε αντίθετα δρομολόγια για τρέχοντα ταξίδια. Όταν ένα πλοίο ταξιδεύει γενικά στην κατεύθυνση της κύριας ροής ρεύματος, δηλαδή κριτήρια υψηλής ταχύτητας, απαιτείται λιγότερος χρόνος διέλευσης και απόσταση διέλευσης. Επιπλέον, μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου όταν εφαρμόζεται η στρατηγική δρομολόγησης με κριτήρια υψηλής ταχύτητας και για τα δύο ταξίδια, τόσο τα ανατολικά όσο και τα δυτικά ταξίδια (ταξίδια προς και από το σημείο προορισμού).

Υπόθεση	Περιγραφή ταξιδιού	V(kts) - Ημερομηνία Αναχώρησης		Κριτήρια ταχύτητας (Va/V)
		Δt(hrs)	Ημερομηνία Αφίξης	
#1			2011/05/28 00:00 2011/06/11 06:00	1.01
#2			2011/05/28 00:00 2011/06/11 06:00	1.02
#3	Ανατολικά	22 3	2011/05/28 00:00	1.03
#4			2011/06/11 03:00	
#5			2011/05/28 00:00 2011/06/11 00:00	1.04
#6			2011/05/28 00:00 2011/06/11 15:00	1.05
#7			2011/05/28 00:00 2011/06/11 12:00	1.01
#8	Δυτικά	22 3	2011/05/28 00:00	1.02
#9			2011/06/11 09:00	
#10			2011/05/28 00:00 2011/06/11 09:00	1.03
			2011/05/28 00:00 2011/06/11 12:00	1.04
			2011/05/28 00:00 2011/06/11 12:00	1.05



Πίνακας 6: Γενική περιγραφή Ταξιδιού (Va: Εφικτή ταχύτητα πλοίου)



Εικόνα 19: Γενικές περιγραφές συνθηκών ταξιδιού και ελαχιστοποίηση κατανάλωσης καυσίμου.

Στον παραπάνω πίνακα απεικονίζονται οι γενικές περιγραφές των συνθηκών ταξιδιού. Ακολούθως, στο σχήμα φαίνεται η σύγκριση της ελαχιστοποίησης κατανάλωσης καυσίμου στις διαδρομές λαμβάνοντας υπόψη τα κριτήρια ταχύτητας στη μέθοδο 3DMI. Οι έγχρωμες ράβδοι υποδηλώνουν την κατανομή των τρέχουσας ταχύτητας. Τα βέλη - οι ράβδοι στο διάγραμμα υποδεικνύουν τις τρέχουσες ταχύτητες και κατευθύνσεις. Παρακάτω, στα διαγράμματα φαίνονται οι συγκρίσεις των επιδόσεων του πλοίου για διαφορετικά τύποι ελαχιστοποιημένων διαδρομών κατανάλωσης καυσίμου παρατηρώντας (α) τις ταχύτητες των πλοίων, (β) τις γωνίες κατεύθυνσης των κυμάτων, (γ) την κατανάλωση καυσίμου, (δ) τις παραμετρικές αποκρίσεις του roll (Fang, 2013).



## 5. Συμπεράσματα – Συζήτηση

### 5.1 Γενικά

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η παρουσίαση διαφορετικών μεθοδολογιών για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής πλοίου μέσω της χρήσης διαφορετικών αλγορίθμων οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη διάφορες παραμέτρους όπως ο θαλάσσιος κυματισμός και τα στοιχεία του ανέμου.

Αρχικά, έγινε μία παρουσίαση της μελέτη του Αλγόριθμου Dijkstra ξεκινώντας από την πιο απλή του μορφή και καταλήγοντας στον Τροποποιημένο Αλγόριθμο Dijkstra. Αφού, παρουσιάστηκαν τα βήματα εκτέλεσης του αλγορίθμου και μέσα από παραδείγματα παρατηρείται ότι είναι αρκετά απλός στην λειτουργία του και τα αποτελέσματα που εξάγει είναι ικανοποιητικά χωρίς να αντιμετωπίζει προβλήματα στην αποφυγή της στεριάς. Ωστόσο, φαίνεται ότι μειονεκτεί στο γεγονός ότι χρειάζεται μεγάλο υπολογιστικό χρόνο για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής και ότι οι καιρικές συνθήκες δεν αλλάζουν κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Ακολουθώντας, μετά την ανάλυση της σχεδίασης και του τρόπου λειτουργίας της Ισόχρονης μεθόδου τόσο στην απλή όσο και στην τροποποιημένη του μορφή διαπιστώθηκε ότι είναι μία πολύ πρακτική μέθοδος, όμως είναι δύσκολη η εφαρμογή της όταν το πλοίο βρίσκεται σε περιοχές όπου υπάρχουν νησιά και σε περιπτώσεις με άσχημες καιρικές συνθήκες παρατηρείται το φαινόμενο του βρόγχου της Ισόχρονης. Δηλαδή, δημιουργείται μια παρατυπία στον σχεδιασμό της Ισόχρονης λόγω της κατάστασης της θαλάσσης που επικρατεί. Αυτά όμως επιλύονται με τη χρήση της βελτιωμένης Ισόχρονης μεθόδου.

Επιπλέον, επικεντρωθήκαμε σε συγκεκριμένα παραδείγματα που δείχνουν τη χρησιμότητα τους. Αναλυτικότερα, στο πρώτο παράδειγμα δρομολόγησης πλοίου μεταφοράς Ε/Κ με την χρήση του αλγορίθμου 3D Dijkstra (3DDA) παρατηρήθηκε ότι αν και διανύει μεγαλύτερη απόσταση, η κατανάλωση καυσίμου είναι μικρότερη σε σχέση με άλλες μεθόδους όπως η ορθοδρομική και λοξοδρομική πλεύση. Στο δεύτερο παράδειγμα όπου διερευνάται η βέλτιστη δρομολόγηση πλοίου με τη βοήθεια του αλγορίθμου Dijkstra στην περιοχή της Ανταρκτικής με παραμέτρους του θαλάσσιου



Παναγιώτης Αγαθοκλέους, Χάρης Κάποντας,  
“Θαλάσσιος κυματισμός και μοντέλα προσδιορισμού βέλτιστης  
διαδρομής πλοίου (Wave modeling and optimal routing models)”

πάγου όπως η συγκέντρωση, το πάχος και η έκταση με την ταχύτητα του ανέμου παρατηρείται η μείωση του χρόνου διαδρομής. Τέλος, η εφαρμογή της τρισδιάστατης τροποποιημένης ισόχρονης μεθόδου σε ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων 2.200 TEU επιτυγχάνει μεγαλύτερη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου όταν ένα πλοίο ταξιδεύει γενικά στην κατεύθυνση της κύριας ροής ρεύματος, δηλαδή με κριτήρια υψηλής ταχύτητας, απαιτείται λιγότερος χρόνος διέλευσης και απόσταση διέλευσης. Έτσι παρατηρώντας τις μεθόδους και τα παραδείγματα, μπορεί εύκολα να συμπεράνει κανείς ότι τα κέρδη που αποκομίζει κανείς από τη χρήση των μεθόδων αυτών είναι πολύ σημαντικά τόσο σε καύσιμα όσο και σε χρήματα.

## 5.2 Προτάσεις μελλοντικής έρευνας

Στην παρούσα μελέτη υπήρξαν περιορισμοί στην πρόσβαση σε διάφορα λογισμικά υπολογισμού της βέλτιστης δρομολόγησης πλοίων λόγω της εμπορικής-εταιρικής φύσης τους για αυτό και εστίασαμε σε συγκεκριμένα παραδείγματα ελαχιστοποίησης τόσο του χρόνου όσο και της κατανάλωσης καυσίμου. Ακόμη δεν αναλύθηκαν λόγω του περιορισμού μεγέθους της διπλωματικής και άλλες μέθοδοι υπολογισμού βέλτιστης δρομολόγησης πλοίων όπως ο γενετικός αλγόριθμος, ο αλγόριθμος Bellman Ford και ο αλγόριθμος A\*. Αυτά τα 2 αντικείμενα θα ήταν πολύ ενδιαφέροντα για μελέτη και έρευνα έτσι ώστε να συγκριθούν και άλλες μέθοδοι υπολογισμού βέλτιστης δρομολόγησης πλοίων και να εξεταστούν πρακτικά στα διάφορα λογισμικά που τους χρησιμοποιούν με σκοπό την εύρεση του πιο αποδοτικού λογισμικού αφού αναλυθούν τα παραπάνω, άρα και την μεγαλύτερη αποδοτικότητα σε καύσιμα και χρήματα.

Επιπλέον, αντικείμενο μελλοντικής αναζήτησης στο συγκεκριμένο πεδίο θα μπορούσε να είναι η εφαρμογή των πιο πάνω αλγορίθμων που να λαμβάνουν υπόψη και άλλους παράγοντες σαν είσοδο εκτός από τα στοιχεία του ανέμου και την κατάσταση θαλάσσης που εστίασαμε στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Συγκεκριμένα με το να λαμβάνεται υπόψη και η χρήση πράσινων εναλλακτικών καυσίμων όπως της αμμωνίας και του LNG συνεπώς και ο τύπος των μηχανών των πλοίων για την εύρεση της βέλτιστης δρομολόγησης των πλοίων μιας και οι συνθήκες που επικρατούν στην παγκόσμια Ναυτιλία με το πλεόνασμα tonnage, των υψηλών



Παναγιώτης Αγαθοκλέους, Χάρης Κάπονας,  
“Θαλάσσιος κυματισμός και μοντέλα προσδιορισμού βέλτιστης  
διαδρομής πλοίου (*Wave modeling and optimal routing models*)”

τιμών καυσίμων και των τελευταίων αναθεωρημένων τιμών των εκπομπών αέριων ρύπων καθιστούν ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα τον προγραμματισμό ταξιδιού εστιάζοντας στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης των καυσίμων που ήταν το δεύτερο κομμάτι που εξετάσαμε μετά την ελαχιστοποίηση του χρόνου, συμβάλλοντας παράλληλα έτσι και στην αειφόρο ανάπτυξη.



## Βιβλιογραφία

1. Βογιατζόγλου, Ι., n.d. *Ανάπτυξη αλγορίθμου Weather Routing*.
2. Γκαβογιάννης Λάμπρος, Γ. Ν., 2017. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΥΡΕΣΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ. Μάιος.
3. Θεόδωρος Καραχάλιος, Ι. Μ., 2017. *Πορεία δρομολόγησης πλοίου - Weather routing*.
4. Σομπόνης, Γ. Β., 2012. *Ευφύης Προσδιορισμός Βέλτιστων Διαδρομών βάσει Μεθόδων Μηχανικής Μάθησης*.
5. Ιωάννης, Β., 2009. *Ανάπτυξη αλγορίθμου Weather Routing*.
6. Anon., 2021. *Tutorialcup*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.tutorialcup.com/interview/algorithm/dijkstra-algorithm.htm>
7. Anon., [Ηλεκτρονικό]  
Available at: [https://el.wikipedia.org/wiki/Αλγόριθμος\\_του\\_Ντάικστρα](https://el.wikipedia.org/wiki/Αλγόριθμος_του_Ντάικστρα)
8. Anon., [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <http://ikee.lib.auth.gr/record/291159/files/theoria>
9. Anon., *Tutorialcup.com*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.tutorialcup.com/interview/algorithm/dijkstra-algorithm.htm>
10. Dongfang Ma, W. M. S. J. X. M., 2020. *Method for simultaneously optimizing ship route and speed with emission control areas*.
11. Xianming Zhu & Hongbo Wang, Z. S. H. L., 2016. *Ship weather routing based on modified Dijkstra algorithm*.
12. Eskild, H., 2014. *Development of a Method for Weather Routing of Ships*.
13. Fang, M.-C., 2013. *THE SHIP-ROUTING OPTIMIZATION BASED ON THE THREE-DIMENSIONAL MODIFIED ISOCHRONE METHOD*, s.l.: Research Gate.
14. Helong Wang, W. M. L. E., n.d. *A Three-Dimensional Dijkstra's algorithm for multi-objective ship voyage optimization*.
15. Roh, M.-I., 2013. *Determination of an economical shipping route considering the effects of sea state for lower fuel consumption*, s.l.: Department of the Naval Architecture and Ocean Engineering and Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea.
16. (M), K. A. (. a. P. D. S., 2008. *Fuel-Efficient Ship Routing*.
17. John Kleinberg, E. T., 2008. *Σχεδιασμός αλγορίθμων*.



Παναγιώτης Αγαθοκλέους, Χάρης Κάποντας,  
“Θαλάσσιος κυματισμός και μοντέλα προσδιορισμού βέλτιστης  
διαδρομής πλοίου (*Wave modeling and optimal routing models*)”

18. Laura WALTHER, A. R. ., M. W. ., C. J., n.d. *Modeling and Optimization Algorithms in Ship Weather Routing\**.
19. S. Dasgupta, C. H. P. a. U. V. V., 2006. *Algorithms*.