

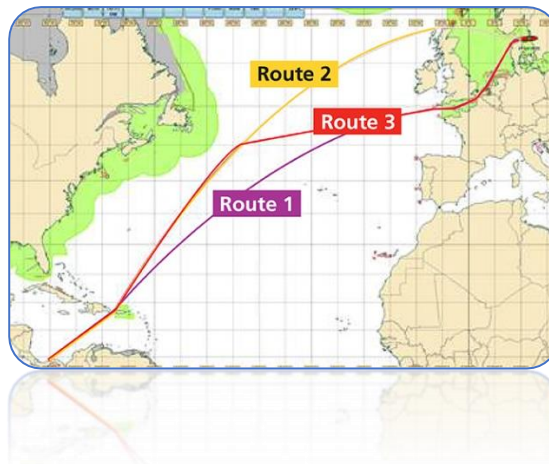


**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ & ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

## **Διπλωματική Εργασία**

**Ανάπτυξη συστήματος αυτόνομης δρομολόγησης πλοίων βάσει καιρικών συνθηκών**



**Φοιτητής: Αλεξάνδρουλος Ευστάθιος**  
**ΑΜ: 47197**

**Επιβλέπουσα Καθηγήτρια**

**Παρασκευή Ζαχαριά**

**Επίκουρη Καθηγήτρια**

**ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2023**

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Παρασκευή Ζαχαρία Επίκουρη Καθηγήτρια	Μιχαήλ Παπουτσιδακης, Καθηγητής	Ελένη-Αικατερίνη Λελίγκου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

**Copyright ©** Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**Αλεξανδρόπουλος Ευστάθιος, Σεπτέμβριος 2023**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος/ή ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΠΟΥΛΟΣ ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ του ΓΕΩΡΓΙΟΥ  
με αριθμό μητρώου 47197 φοιτητής/τρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της  
Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ δηλώνω υπεύθυνα ότι:  
ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ & ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο/Η Δηλών/ούσα  
ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΠΟΥΛΟΣ  
ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ



## **Ευχαριστίες**

Καταρχάς θέλω να εκφράσω την ευχαρίστηση μου στην επιβλέπουσα μου καθηγήτρια Παρασκευή Ζαχαριά για την αμέριστη βοήθεια της χωρίς την οποία θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης νιώθω ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη για την οικογένειά μου για τη συνεχή ενθάρρυνση και την πίστη στις ικανότητές μου. Η αγάπη και η υποστήριξή τους αποτέλεσαν τη βάση πάνω στην οποία χτίστηκε αυτό το έργο. Επιπρόσθετα, θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους και ιδιαίτερα τη σύντροφο μου Αποστολίνα αλλά και τον ευρύτερο περίγυρο μου για την ηθική υποστήριξη, τις συζητήσεις και τα κίνητρα καθόλο το χρόνο φοίτησης μου στη σχολή.

Τελειώνοντας, θέλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην ακαδημαϊκή κοινότητα και στους πολυάριθμους πόρους που συνέβαλαν στη διαμόρφωση των γνώσεων και της κατανόησής μου. Αυτή η διπλωματική εργασία αποτελεί το επιστέγασμα της συλλογικής προσπάθειας και υποστήριξης αυτών των ατόμων και είμαι ειλικρινά ευγνώμων για τη συμβολή τους.

## **Περίληψη**

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την ανάπτυξη συστήματος δρομολόγησης πλοίων βάσει καιρικών συνθηκών. Η δρομολόγηση των πλοίων βάσει καιρικών συνθηκών έχει λάβει σημαντικά αυξανόμενη προσοχή τα τελευταία χρόνια τόσο στον ακαδημαϊκό κόσμο όσο και στη βιομηχανία. Τα προβλήματα σε αυτόν τον τομέα εξετάζουν την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής και ταχύτητας πλεύσης για ένα δεδομένο ταξίδι λαμβάνοντας υπόψη τις περιβαλλοντικές συνθήκες του ανέμου και των κυμάτων. Οι στόχοι συνήθως εξετάζουν την ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους, της κατανάλωσης καυσίμου ή του κινδύνου διέλευσης.

### **Λέξεις – κλειδιά**

Αυτόνομη δρομολόγηση πλοίων, βέλτιστη διαδρομή πλοίου, καιρικές συνθήκες, ταχύτητα πλεύσης

## **Abstract**

The present dissertation deals with the development of a ship routing system based on weather conditions. Ship routing based on weather conditions has received significantly increased attention in recent years, both in the academic world and in the industry. The problems in this field involve finding the optimal route and speed for a given voyage, considering environmental conditions such as wind and waves. The objectives usually focus on minimizing operational costs, fuel consumption, or the risk of passage.

## **Keywords**

Autonomous ship routing, optimal ship route, weather conditions, sailing speed.

## Περιεχόμενα

<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>13</b>
<b>Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας</b> .....	<b>13</b>
<b>Σκοπός και στόχοι</b> .....	<b>13</b>
<b>Μεθοδολογία</b> .....	<b>13</b>
<b>Δομή</b> .....	<b>14</b>
<b>1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Δρομολόγηση πλοίων</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1 Βελτιστοποίηση ταξιδιού</b> .....	<b>15</b>
<b>1.2 Αλγόριθμοι δρομολόγησης πλοίων</b> .....	<b>16</b>
1.2.1 Υπολογισμός των μεταβολών .....	16
1.2.2 Ισόχρονη μέθοδος .....	18
1.2.3 Ισόπονη μέθοδος .....	20
1.2.4 Αλγόριθμος Dijkstra.....	21
1.2.5 Άμεση μέθοδος.....	22
1.2.6 Γεννητικοί αλγόριθμοι .....	24
1.2.7 Δυναμικός προγραμματισμός.....	25
<b>1.3 Πρόβλεψη καιρικών συνθηκών</b> .....	<b>27</b>
<b>1.4 Πλοήγηση πλοίων</b> .....	<b>29</b>
<b>2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : Ασαφής λογική</b> .....	<b>31</b>
<b>2.1 Εισαγωγή</b> .....	<b>31</b>
<b>2.2 Περιγραφή Μοντέλου</b> .....	<b>32</b>
2.2.1 Μονάδα ασαφοποίησης.....	32
2.2.2 Βάση γνώσης.....	33
2.2.3 Μηχανή εξαγωγής συμπερασμάτων.....	34
<b>3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Παράμετροι πλοήγησης</b> .....	<b>35</b>
<b>3.1 Αντίσταση, Αντοχή &amp; Συμπεριφορά πλοίου</b> .....	<b>35</b>
<b>3.2 Άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες</b> .....	<b>37</b>
3.2.1 Θαλάσσιες δοκιμές.....	38
3.2.2 Χειριστής πλάτους απόκρισης(Response amplitude operator) .....	40
<b>3.3 Ισχύς Πλοίου</b> .....	<b>42</b>
<b>4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : Συστήματα αυτόνομης πλοήγησης – Εταιρίες</b> .....	<b>43</b>
<b>4.1 NAPA</b> .....	<b>43</b>
4.1.1 NAPA Voyage Optimization .....	44
<b>4.2 Offshore Navigation</b> .....	<b>47</b>
4.2.1 VoyOpt.....	50
<b>4.3 Copernicus Marine Service</b> .....	<b>53</b>
<b>5 Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Εφαρμογή</b> .....	<b>56</b>
<b>5.1 Περιγραφή συστήματος</b> .....	<b>56</b>
5.1.1 Είσοδοι - Έξοδοι .....	56
5.1.2 Συναρτήσεις συμμετοχής .....	57
5.1.3 Σύνολο κανόνων.....	61
<b>6 Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup> :Αποτελέσματα, Συμπεράσματα &amp; Μελλοντικές Προοπτικές</b> .....	<b>64</b>



<b>6.1</b>	<b>Αποτελέσματα μελέτης περίπτωσης της εφαρμογής .....</b>	<b>64</b>
6.1.1	Συγκεντρωτικά στοιχεία σεναρίων μελέτης κατανάλωσης καυσίμων.....	67
<b>6.2</b>	<b>Συμπεράσματα και μελλοντικές προοπτικές .....</b>	<b>70</b>
<b>7</b>	<b>Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές .....</b>	<b>72</b>

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1-1 Γραφική απεικόνιση της εφικτής περιοχής προβλήματος βελτιστοποίησης .	16
Εικόνα 1-2 Μονοπάτι ελάχιστης διαδρομής -διακεκομμένη γραμμή) .....	18
Εικόνα 1-3 Κατασκευή ισόχρονων γραμμών .....	20
Εικόνα 1-4 Απεικόνιση της μεθόδου DIRECT μετά από πολλές επαναλήψεις (2-διαστάσεις) (Finkel, 2003) <a href="https://www.semanticscholar.org/paper/Global-optimization-with-the-direct-algorithm-Finkel-Kelley/2ba8925266a9f8cce7a0495885f9b47836cc3679">https://www.semanticscholar.org/paper/Global-optimization-with-the-direct-algorithm-Finkel-Kelley/2ba8925266a9f8cce7a0495885f9b47836cc3679</a> .....	23
Εικόνα 2-1 Γενική μορφή συστήματος ασαφούς λογικής με μονάδες ασαφοποιητή και αποασαφοποιητή .....	31
Εικόνα 4-1 Λογότυπο της εταιρίας NAPA .....	43
Εικόνα 4-2 Στιγμιότυπο οθόνης NAPA Voyage Optimization .....	44
Εικόνα 4-3 Περίπτωση χρήσης- εναλλακτικές διαδρομές.....	45
Εικόνα 4-4 Πληροφορίες καιρικών συνθηκών - απεικόνιση στο χάρτη πλοήγησης.....	46
Εικόνα 4-5 Διάγραμμα λειτουργικότητας NAPA Voyage Optimization .....	47
Εικόνα 4-6 Πλατφόρμα εφαρμογής της Offshore Navigation <a href="https://www.offshorenavigation.com/wp-content/uploads/2022/03/Screenshot-2022-03-16-at-1.08.15-PM.png">https://www.offshorenavigation.com/wp-content/uploads/2022/03/Screenshot-2022-03-16-at-1.08.15-PM.png</a> .....	48
Εικόνα 4-7 Ανάλυση εφαρμογής για βελτιστοποίηση ταξιδιού <a href="https://www.offshorenavigation.com/wp-content/uploads/2022/03/mockuper-1-grey.png">https://www.offshorenavigation.com/wp-content/uploads/2022/03/mockuper-1-grey.png</a> .....	49
Εικόνα 4-8 Μελέτη περίπτωσης για δρομολόγηση πλοίου <a href="https://marine.copernicus.eu/sites/default/files/media/image/use_case/voyopt_illustration.png?i%20k=8DqN8XFq">https://marine.copernicus.eu/sites/default/files/media/image/use_case/voyopt_illustration.png?i%20k=8DqN8XFq</a> .....	50
Εικόνα 4-9 Λογότυπο κεντρικής ιστοσελίδας του συστήματος Copernicus <a href="https://marine.copernicus.eu/register-copernicus-marine-service?mtm_campaign=Copernicus-Souscription&amp;mtm_medium=cpc&amp;mtm_source=google&amp;mtm_content=text&amp;mtm_cid=145762311002&amp;mtm_kwd=copernicus%20marine%20service&amp;gclid=Cj0KCQjw0bunBhD9ARIsA">https://marine.copernicus.eu/register-copernicus-marine-service?mtm_campaign=Copernicus-Souscription&amp;mtm_medium=cpc&amp;mtm_source=google&amp;mtm_content=text&amp;mtm_cid=145762311002&amp;mtm_kwd=copernicus%20marine%20service&amp;gclid=Cj0KCQjw0bunBhD9ARIsA</a>	

AZI0E2bITVdHZ78vslc3Z9rnmUP7wIVltVs7Km59CGtQH_- jVLqdlEUsuMaAlZ_EALw_wcB.....	54
Εικόνα 5-1 Μοντέλο εφαρμογής, τριών εισόδων και μίας εξόδου.....	57
Εικόνα 5-2 Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου ταχύτητα πλοίου.....	58
Εικόνα 5-3 Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου αντίσταση πλοίου.....	59
Εικόνα 5-4 Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου ύψος κυμάτων .....	60
Εικόνα 5-5 Συναρτήσεις συμμετοχής έξοδος κατανάλωση καυσίμου .....	61
Εικόνα 6-1 Σενάριο συστήματος με εισόδους τις τιμές 8, 4, 1 και έξοδο την τιμή 1,75 ..	64
Εικόνα 6-2 Σενάριο συστήματος με εισόδους τις τιμές 7, 5, 3 και έξοδο την τιμή 1,75 ..	65
Εικόνα 6-3 Σενάριο συστήματος με εισόδους τις τιμές 10, 2, 3 και έξοδο την τιμή 1,75	65
Εικόνα 6-4 Σενάριο συστήματος με εισόδους τις τιμές 6, 3, 4 και έξοδο την τιμή 1,43 ..	65
Εικόνα 6-5 Σενάριο συστήματος με εισόδους τις τιμές 10, 5, 7 και έξοδο την τιμή 2.57	66
Εικόνα 6-6 Σενάριο συστήματος με εισόδους τις τιμές 5, 2, 2 και έξοδο την τιμή 0,934	66
Εικόνα 6-7 Επιφάνεια ελέγχου κατανάλωσης καυσίμου(άξονας z) συναρτήσει αντίστασης πλοίου (άξονας x) και ταχύτητας πλοίου (άξονας y) .....	68
Εικόνα 6-8 Επιφάνεια ελέγχου κατανάλωσης καυσίμου(άξονας z) συναρτήσει ύψους κυμάτων (άξονας x) και ταχύτητας πλοίου (άξονας y).....	69
Εικόνα 6-9 Επιφάνεια ελέγχου κατανάλωσης καυσίμου(άξονας z) συναρτήσει ύψους κυμάτων πλοίου (άξονας x) και αντίστασης πλοίου (άξονας y) .....	70

## **Κατάλογος Πινάκων**

Πίνακας 1α Σύνολο κανόνων ασαφούς συστήματος .....	62
Πίνακας 2β Σύνολο κανόνων ασαφούς συστήματος .....	63
Πίνακας 3 Συγκεντρωτικά στοιχεία εισόδων-εξόδου για τα 6 σενάρια δοκιμής της εφαρμογής .....	67

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας**

Αντικείμενο της εργασίας είναι η μελέτη και ανάπτυξη μοντέλου αυτόνομης δρομολόγησης πλοίων βάσει παραμέτρων που στηρίζονται στις καιρικές συνθήκες.

### **Σκοπός και στόχοι**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται η ανάπτυξη ενός μοντέλου για τη δρομολόγηση πλοίων λαμβάνοντας υπόψη τον καιρό και τις βελτιστοποιήσεις ταξιδιών στις θαλάσσιες μεταφορές, εξηγώντας τις κύριες μεθοδολογικές προσεγγίσεις και τους βασικούς κλάδους που αντιμετωπίζουν αυτό το πρόβλημα. Οι κύριες μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος της δρομολόγησης βάσει καιρού περιλαμβάνουν τη χρήση αλγορίθμων εύρεσης μονοπατιών και ευρετικών αλγορίθμων, ενώ τα τελευταία χρόνια έχουν αυξηθεί και οι εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης.

Στόχοι της διπλωματικής εργασίας είναι οι: αποτύπωση του προβλήματος λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά μιας συγκεκριμένης θαλάσσιας περιοχής που σχετίζονται με τις διαδρομές των πλοίων και την κυκλοφοριακή ροή, η συλλογή δεδομένων, η ανάπτυξη ενός μοντέλου που βασίζεται σε Ασαφή Λογική ή/και Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα, το οποίο θα στοχεύει στην δημιουργία ενός μοντέλου ικανού να παράγει αυτόνομα διαδρομές για τα πλοία βάσει καιρικών συνθηκών.

### **Μεθοδολογία**

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην εργασία αυτή περιλαμβάνει δύο επιμέρους τμήματα. Στο πρώτο μελετήθηκε η σχετική βιβλιογραφία που μας προτάθηκε από την κα. Ζαχαριά με σκοπό τον προσδιορισμό του προβλήματος της δρομολόγησης πλοίων και συγκεκριμένα το στοιχείο που αφορά την κατανάλωση καυσίμων. Το δεύτερο περιλάμβανε την μελέτη των συστημάτων ασαφούς λογικής και τη δημιουργία και ανάπτυξη ενός μοντέλου για τη συσχέτιση της κατανάλωσης καυσίμων από τα πλοία συναρτήσει παραμέτρων όπως ύψος κυμάτων, αντίσταση πλοίου και ταχύτητα.

## **Δομή**

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 6 κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο ασχολείται με τη δρομολόγηση των πλοίων και συγκεκριμένα με τους υφιστάμενους αλγορίθμους οι οποίοι βελτιστοποιούν τις θαλάσσιες διαδρομές. Το επόμενο κεφάλαιο ασχολείται με την ασαφή λογική πάνω στην οποία στηρίχτηκε και το μοντέλο ανάπτυξης της εργασίας. Οι παράμετροι της πλοήγησης στις θαλάσσιες διαδρομές είναι αντικείμενο μελέτης του τρίτου κεφαλαίου, ενώ στο επόμενο κεφάλαιο αναφέρονται τα κυριότερα συστήματα πλοήγησης που χρησιμοποιούνται για την πλοήγηση σε παγκόσμια κλίμακα.

Η περιγραφή του μοντέλου ανάπτυξης καθώς και τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την εφαρμογή είναι αντικείμενο του πέμπτου κεφαλαίου. Τέλος στο έκτο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα και οι μελλοντικές προοπτικές της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

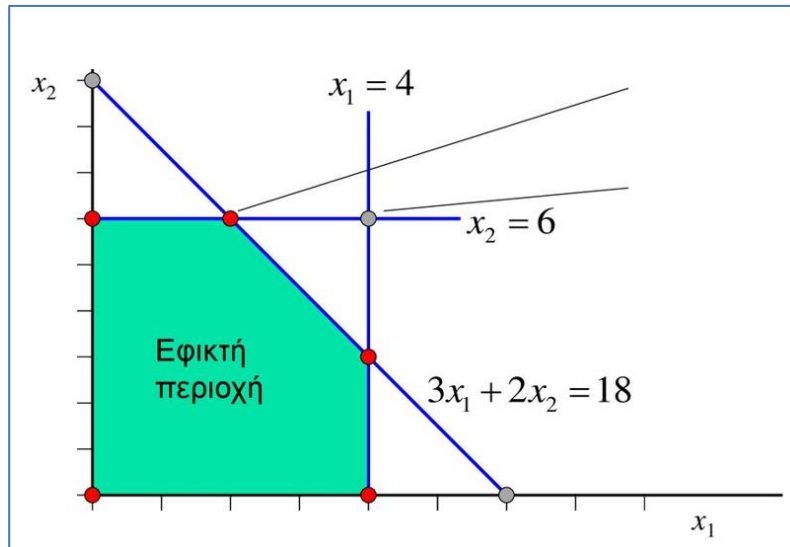
## **1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Δρομολόγηση πλοίων**

Το κεφάλαιο αυτό ασχολείται με τη βελτιστοποίηση του ταξιδιού δηλαδή την τροποποίηση της πορείας ενός πλοίου λαμβάνοντας υπόψιν δεδομένα καιρού για την περιοχή που πρόκειται να γίνει ο πλους. Επίσης περιγράφονται και αναλύονται βασικοί αλγόριθμοι που ασχολούνται με τη λύση των προβλημάτων που έχουν σχέση με τη βελτιστοποίηση στην πλοήγηση.

### **1.1 Η Βελτιστοποίηση στην πλοήγηση**

Η εύρεση της βέλτιστης θαλάσσιας διαδρομής είναι αντικείμενο μελέτης του κλάδου των εφαρμοσμένων μαθηματικών. Στη βελτιστοποίηση γίνεται χρήση μαθηματικών μοντέλων ώστε να βρεθεί η βέλτιστη λύση ενός δεδομένου προβλήματος με στόχο ο εντοπισμός της καλύτερης λύσης ή την καλύτερης εφικτή λύση, Lundgren et al. (2010) [1]. Αν η καλύτερη λύση δεν είναι δυνατό να ικανοποιεί μέσα από μια σειρά κριτηρίων τότε η καλύτερη εφικτή λύση θεωρείται και η βέλτιστη.

Κατά τη θεωρία της βελτιστοποίησης υπάρχουν τρεις βασικές παράμετροι, αυτές είναι η αντικειμενική συνάρτηση, οι μεταβλητές απόφασης και οι περιορισμοί. Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης θα πρέπει να μεγιστοποιηθεί ή ελαχιστοποιηθεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, με αυτό τον τρόπο βρίσκεται η βέλτιστη λύση ανάμεσα από ένα σύνολο εφικτών λύσεων. Η αντικειμενική συνάρτηση εξαρτάται από ένα πλήθος μεταβλητών απόφασης στο οποίο αλλάζοντας τις τιμές των εκάστοτε μεταβλητών βρίσκουμε τη βέλτιστη λύση. Η αντικειμενική συνάρτηση συχνά έχει περιορισμούς οι οποίοι και αλλάζουν συνήθως την εφικτή περιοχή (εικ.1-1).



Εικόνα 1-1 Γραφική απεικόνιση της εφικτής περιοχής προβλήματος βελτιστοποίησης

## 1.2 Αλγόριθμοι δρομολόγησης πλοίων

Στην παράγραφο αυτή θα αναπτυχθούν οι κυριότεροι από τους αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται για τη δρομολόγηση των πλοίων.

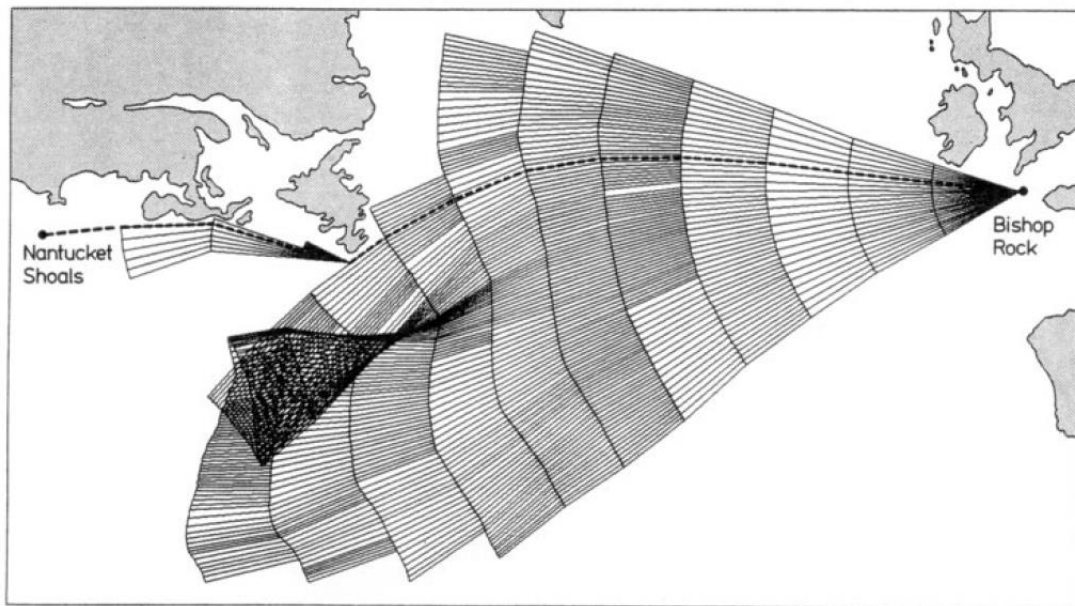
### 1.2.1 Υπολογισμός των μεταβολών

Ο λογισμός των μεταβολών είναι ένα πεδίο της μαθηματικής ανάλυσης που ασχολείται με τη μεγιστοποίηση ή την ελαχιστοποίηση συναρτήσεων, οι οποίες είναι εκφράζουν αντιστοιχίσεις από ένα σύνολο συναρτήσεων στους πραγματικούς αριθμούς. Οι συναρτήσεις εκφράζονται συχνά ως ορισμένα ολοκληρώματα που περιέχουν συναρτήσεις και τις παράγωγές τους. Η βασική θεωρία του λογισμού των μεταβολών είναι η επίλυση των εξισώσεων Euler-Lagrange. Στο πεδίο δρομολόγησης πλοίων, αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται συνήθως με τη βελτιστοποίηση των ελάχιστων χρονικών διαδρομών μέσω διακύμανσης των παραμέτρων ελέγχου τροχιάς (Walther, et al, 2016) [2]. Οι Hamilton, et al (1961) [3] πραγματοποίησαν δύο περιπτώσιολογικές μελέτες με λογισμό διακυμάνσεων για τον ελάχιστο χρόνο δρομολόγησης του πλοίου: Στην πρώτη περίπτωση υποτίθεται ότι η ταχύτητα του πλοίου είναι κατά κύριο λόγο συνάρτηση της θέσης και η δεύτερη περίπτωση υποθέτει ότι η ταχύτητα του πλοίου είναι συνάρτηση της κατεύθυνσης καθώς και της θέσης του. Και στις δύο περιπτώσεις η ταχύτητα του πλοίου εξαρτάται από το χρόνο, και συνέστησε ότι η περίπτωση 2 είναι καλύτερη για λειτουργική προσαρμογή. Ακολουθώντας την εργασία του Hamilton, οι Haltiner, et al (1962) [4] έλυσαν το ίδιο πρόβλημα υποθέτοντας ότι το κυματικό πεδίο είναι σταθερό και χρησιμοποιώντας τη στατική μορφή της εξίσωσης Euler. Ο Faulkner (1962, 1963) [5] επέκτεινε



αυτή τη θεωρία θεωρώντας το κυματικό πεδίο ως συνάρτηση του χρόνου. Οι Bleick, et al (1965) [6] προχώρησαν για να αποδείξουν ότι οι αριθμητικές ενσωματώσεις που εμπλέκονται στη θεωρία της δρομολόγησης πλοίου ελάχιστου χρόνου μέσω πεδίων κυμάτων που εξαρτώνται από το χρόνο είναι εφικτές και επίσης είναι απαραίτητες οι τρισδιάστατες παρεμβολές στα δεδομένα στον κυματικό πεδιακό χώρο. Ο De στα τέλη του 1960 [7] εφαρμόζει το θεώρημα που είχε αναπτύξει ο Pontrygain σχετικά με τον έλεγχο διεργασιών που δύναται να ελεγχθούν με βέλτιστο τρόπο με σκοπό την επίλυση του προβλήματος για την μείωση του χρόνου που χρειάζεται μία θαλάσσια διαδρομή. Στα μέσα του 1970 ο Bijtsma [8] ασχολείται και αυτός με την εύρεση της λύσης του προβλήματος του συνόλου από ίχνη για να βρεθεί ο μικρότερος χρόνος με τη μέθοδο του λογισμού μεταβολών αλλά και με τη θεωρία για βέλτιστο έλεγχο (αρχή του μέγιστου Pontrygain). Στο διδακτορικό του, πρότεινε τη χρήση πολικού διαγράμματος για την ταχύτητα μέσω του οποίου η ταχύτητα πλοίου εξαρτάται από τη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην κατεύθυνση του σκάφους και στην κατεύθυνση που ορίζει το κύμα κύματος τις χρονικές στιγμές που οι μεταβλητές θέσης και χρόνου για τη διέλευση δεν μεταβάλλονται.

Στη θεωρία που ανέπτυξε χρησιμοποίησε μία απαραίτητη ομάδα τεσσάρων προϋποθέσεων από την κλασική θεωρία του λογισμού των μεταβολών του Euler του Lagrange του Weiersstras, Legendre και του Jaccobi[9] με σκοπό να ανακαλύψει τόξου το οποίο διαθέτει το ελάχιστο για το πρόβλημα. Φτιάχνει ένα σύνολο χρονικών μετώπων όπου το πλοίο θα επισκέπτεται ανά ένα εξάωρο ή ένα δωδεκάωρο, για να ληφθεί το τελικό απόλυτο ελάχιστο όπως φαίνεται στο εικόνα 1-2. Άγγιξε επίσης τη δρομολόγηση της ελάχιστης κατανάλωσης καυσίμου με την χρησιμοποιώντας τα στοιχεία που είχε αναπτύξει στο διδακτορικό του και ερμήνευσε με λεπτομέρεια το σύνολο της υπολογιστικής μεθόδου του προβλήματος μία εικοσιπενταετία μετά (Bijtsma, 2001) [10]. Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόζεται για την ελάττωση της ταλαιπωρίας πληρώματος πλοίου αλλά και πιθανόν καταστροφών στα αντικείμενα που μεταφέρει. Ο ίδιος ο Bijtsma το 2002 [10] σύλλεξε με χρήση υπολογιστικών μεθόδων θαλάσσιες διαδρομές από απαιτούν το λιγότερο δυνατό χρόνο στηριζόμενος στη θεωρία της αρχής του μεγίστου και στη σχέση που προκύπτει από το δυναμικό προγραμματισμό θεωρώντας ότι η πλευση του πλοίου περιγράφεται από μία συνεχή συνάρτηση. Στη συνέχεια, Ο Bijtsma το 2004 [10] ανέπτυξε τη θεωρία που αφορά τα χρονικά μέτωπα οι οποίες βρίσκουν εφαρμογή στον τομέα της μείωσης στη χρήση καυσίμων με σκοπό να εντοπίσει το συσχετισμό τους ανάμεσα σε αυτές και στη μέθοδο που είχε περιγράψει της Energyfront.



Εικόνα 1-2 Μονοπάτι ελάχιστης διαδρομής -διακεκομμένη γραμμή)

Μετά από αυτό, (Bijlsma, 2004)[10] εισήγαγε περιορισμένη ικανότητα ελιγμών στη δρομολόγηση ελάχιστου χρόνου/κατανάλωσης καυσίμου που δίνει μια πιο ρεαλιστική εικόνα στη ναυσιπλοΐα του πλοίου. Τέσσερα έτη μετά δηλαδή το 2008, ο Bijtsma (2008)[10] προτείνει μία υπολογιστικά εύκολη διαδικασία για την ελαχιστοποίηση των ρύπων από τα πλοία η οποία στηρίζεται στη θεωρία μεταβολής της διακύμανσης, και η βάση της είναι ο καθορισμός του όγκου καυσίμου το οποία είναι απαραίτητο για την πλεύση ανάμεσα σε δύο αντιδιαμετρικά σημεία ωκεανού, έτσι βρίσκει την δρομολόγηση για τον ελάχιστο ελάχιστο χρόνο η οποία μπορεί να γίνει με τον δεδομένο όγκο από καυσίμα. Ουσιαστικά, ο λογισμός των παραλλαγών αντιμετωπίζει τη δρομολόγηση του πλοίου ως ένα μαθηματικό πρόβλημα και χρησιμοποιεί τη θεωρία βέλτιστου ελέγχου για την επίλυσή του. Αυτή η μέθοδος δίνει ένα σύνολο πληροφορίας που έχει σχέση με την ίδια πηγή του προβλήματος πλοήγησης και αποτελεί την απαρχή μεθοδολογιών που έχουν αναπτυχθεί όπως είναι η ισόχρονη και ισόπονη μέθοδος.

### 1.2.2 Η μέθοδος των ισόχρονων μεταβολών

Ο Robert.James[11] στα τέλη της δεκαετίας το '40 προτείνει μία από τις πιο γνωστές μεθόδους για τη θαλάσσια πλοήγηση πλοίων αυτή της ισόχρονης μεθόδου. Κατά την ισόχρονη μέθοδο η διαδρομή που θα ακολουθήσει το πλοίο χωρίζεται σε μικρότερα διαστήματα μέσα στα οποία η πλεύση διαρκεί το ίδιο χρονικό διάστημα δηλαδή έχουμε σταθερό χρόνο.

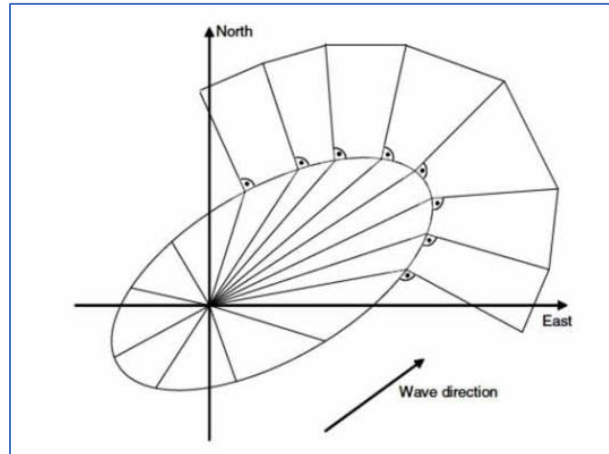
Η θεωρία του ισόχρονου είναι μία παραλλαγή του της μεθόδου που περιέγραψε ο Hagīwura η οποία εμπλουτίστηκε με 3 επιπλέον μεθόδους που σχετίζονται με την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Η 1<sup>η</sup> μέθοδος έχει σχέση με τη μείωση του χρόνου για το θαλάσσιο ταξίδι, η επόμενη ασχολείται με την ελάττωση του απαιτούμενου όγκου καυσίμων και η τρίτη με την κόστος καυσίμου ανά όγκο χρέωσης.

Για την εύρεση του μικρότερου χρόνου της προτεινόμενης διαδρομής θα πρέπει να ελαχιστοποιήσουμε την αντικειμενική συνάρτηση κόστους η οποία ορίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$J = \int_{t_0}^{t_f} A(X, U, t) dt + B(t_f, t_s)$$

όπου η συνάρτηση  $A(X, U, t)$  είναι η μεταβλητή που αποφασίζει και εξαρτάται από την τη θέση του πλοίου  $X$ , τον χρόνο διαστήματος  $t$  που έχει ταξιδέψει καθώς και το διάνυσμα ελέγχου  $U$  με πληροφορίες για την πορεία του πλοίου, η συνάρτηση  $B(t_f, t_s)$  λειτουργεί ως πέναλι με την θετική τιμή της να δηλώνει την άφιξη του πλοίου στον προορισμό με καθυστέρηση χρόνου σύμφωνα με τον αρχικό σχεδιασμό. Οι χρόνοι  $t_0, t_s, t_f$  αναφέρονται στους χρόνους για την αναχώρηση, στην ώρα που έχουμε προγραμματίσει την άφιξη και στην πραγματική ώρα άφιξης αντίστοιχα. Για τους σκοπούς της μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου η μεταβλητή απόφασης ονομάζεται  $F$ , ενώ για την ελαχιστοποίηση του κόστους είναι  $C$ . Για το πέναλι απόφασης ισχύουν τα παρακάτω: στην περίπτωση της μείωσης της κατανάλωσης καυσίμων έχουμε  $B(t_f, t_s) = \infty$  για  $t_f > t_s$  ενώ κατά την αναζήτηση του ελάχιστου κόστους ισχύει  $B(t_f, t_s) = w(t_f - t_s)^2$  για  $t_f > t_s$  με  $w$  μία σταθερά που επιλέγεται σε κάθε περίπτωση.

Με βάση την μέθοδο αυτή σχεδιάζεται στο χάρτη μία τεθλασμένη γραμμή η οποία ενώνει την αφετηρία και την άφιξη του πλοίου σε κάθε τμήμα της οποίας το πλοίο χρειάζεται τον ίδιο χρόνο πλεύσης. Το μήκος κάθε τμήματος της τεθλασμένης αυτής ευθείας είναι διαφορετικό καθώς παράγοντες όπως είναι η αντίσταση του πλοίου ποικίλουν με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται το μήκος ώστε να διατηρείται ο χρόνος σταθερός. Στην εικόνα 1-2 που ακολουθεί φαίνεται ένα σύνολο από ισόχρονες γραμμές (Szlapczynska Smierchalski 2007) [12].



Εικόνα 1-3 Κατασκευή ισόχρονων γραμμών

<https://www.researchgate.net/profile/Joanna-Szlapczynska/publication/238194267/figure/fig1/AS:298726632509440@1448233387356/Construction-of-the-first-and-second-isochrone.png>

### 1.2.3 Ισόπνη μέθοδος

Η αρχή της ισόπνης μεθόδου (Klompstra, et al, 1992; [13] Spaans, 1995) [14] είναι παρόμοια με τη μέθοδο την ισόχρονη μέθοδο που περιεγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή ορίζονται διαδοχικά σημεία στον χάρτη πλοήγησης του πλοίου όπου η πλεύση από οποιοδήποτε σημείο στο επόμενο του απαιτεί την ίδια ποσότητα καυσίμου σε σχέση με το χρόνο πλεύσης της ισόχρονης μεθόδου. Αρχικά το πρώτο ισόπνο ορίζεται ως το σύνολο των εφικτών σημείων από το αρχικό σημείο με σταθερή ποσότητα καυσίμου και μεταβαλλόμενη πορεία πλοίου. Στη συνέχεια, όλα αυτά τα σημεία στο πρώτο ισόπνο θεωρούνται αρχικά σημεία για τον υπολογισμό του δεύτερου ισόπνου. Για κάθε σημείο στο πρώτο ισόπνο, μπορούν να προσδιοριστούν ενεργειακά μέτωπα και το περίβλημα όλων αυτών των ενεργειακών μετώπων ορίζεται ως δεύτερο ισόπνο, αυτή η διαδικασία μπορεί να επεκταθεί σε τρεις διαστάσεις. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται για τα επόμενα ισόπνα έως ότου ένα ισόπνο διασχίσει τον προορισμό. Εδώ, στο τελευταίο βήμα, η ποσότητα του καυσίμου προσαρμόζεται για να κάνει το τελικό ισόπνο να διασχίσει το σημείο προορισμού στο στοχευόμενο ETA στον άξονα του χρόνου. Τέλος, η ελάχιστη διαδρομή καυσίμου μπορεί να γίνει με την ανίχνευση των μεταβλητών ελέγχου (κατευθύνσεις και ταχύτητες) που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη του σημείου στο ισόπνο που εφάπτεται στον άξονα του χρόνου στο σημείο του αντίστοιχου προορισμού σε κάθε στάδιο. Αυτή η μέθοδος είναι παρόμοια

με τη θεωρία δυναμικού προγραμματισμού καθώς χρησιμοποιεί τον αναδρομικό αλγόριθμο προς τα εμπρός, αλλά έχει οδηγήσει σε μέτριες βελτιώσεις στην απόδοση υπολογισμού.

#### **1.2.4 Αλγόριθμος Dijkstra**

Ο Dijkstra πρότεινε τη βασική θεωρία αυτής της μεθόδου το 1959[15]. Αυτή η μέθοδος αρχικά στοχεύει να βρει τη διαδρομή ελάχιστου συνολικού μήκους μεταξύ των  $n$  κόμβων που συνδέονται σε ένα γράφημα, έτσι ώστε να μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως ένα είδος μεθόδου βελτιστοποίησης αναζήτησης γραφήματος. Από τότε έχουν αναπτυχθεί πολλές επεκτάσεις και τροποποιήσεις αυτής της μεθόδου για την επίλυση διαφορετικών τύπων πρακτικών προβλημάτων. Όσον αφορά τη δρομολόγηση του καιρού, ένα δίκτυο συνδεδεμένο με  $n$  κόμβους θα πρέπει να κατασκευαστεί με βάση το σύστημα δικτύων πριν από τη βελτιστοποίηση και στη συνέχεια θετικά βάρη, τα οποία αντιπροσωπεύουν το χρόνο διέλευσης, την κατανάλωση καυσίμου ή άλλες μεταβλητές, αντιστοιχίζονται στα άκρα του γραφήματος. Αναλύοντας το άθροισμα των βαρών σε αυτό το δίκτυο, μπορεί να προσδιοριστεί η βέλτιστη διαδρομή με διαφορετικούς στόχους. Ο Bottner (2007)[16] εφάρμοσε έναν πολλαπλών στόχων αλγόριθμο δρομολόγησης καιρού δύο στόχων (συντομότερη διαδρομή και συντομότερη δυνατή χρονική περίοδος). Οι Pannigrahi και Umesch (2008)[17] ναύλωσαν την χαμηλότερη χρονική διαδρομή κάνοντας χρήση της μεθόδου του Dijkstra πάνω από την θάλασσα της Αραβίας με το μοντέλο φασματικών κυμάτων της τρίτης γενιάς WAAM. Τα αδέρφια Paadhy, et al (2008)[18] βρήκαν επίσης αξιόπιστη βέλτιστη διαδρομή με το σχήμα βελτιστοποίησης διαδρομής του Dijkstra βασισμένοι πάνω στις πληροφορίες ύψους κύματος από τις εγγραφές υψομέτρου GEOSAT λαμβάνοντας υπόψη την εθελοντική μείωση ταχύτητας. Οι Takashima, et al (2009)[19] εφάρμοσαν τον αλγόριθμο του Dijkstra για να υπολογίσουν μια βέλτιστη ελάχιστη διαδρομή καυσίμου ιδανική για παράκτια εμπορικά πλοία με την χρήση των ακριβή προβλεπόμενων περιβαλλοντικών δεδομένων και των δεδομένων απόδοσης πρόωσης του πλοίου στις πραγματικές θάλασσες. Συνέλεξαν ακόμα και τα δεδομένα κυμάτων για την περιοχή του Βόρειου Ινδικού Ωκεανού μέσω του μοντέλου WAAM, αλλά μελέτησαν και κάποιους πιο ρεαλιστικούς περιορισμούς όπως για παράδειγμα είναι τα όρια της ξηράς, το μη πλωτό νερό, τις

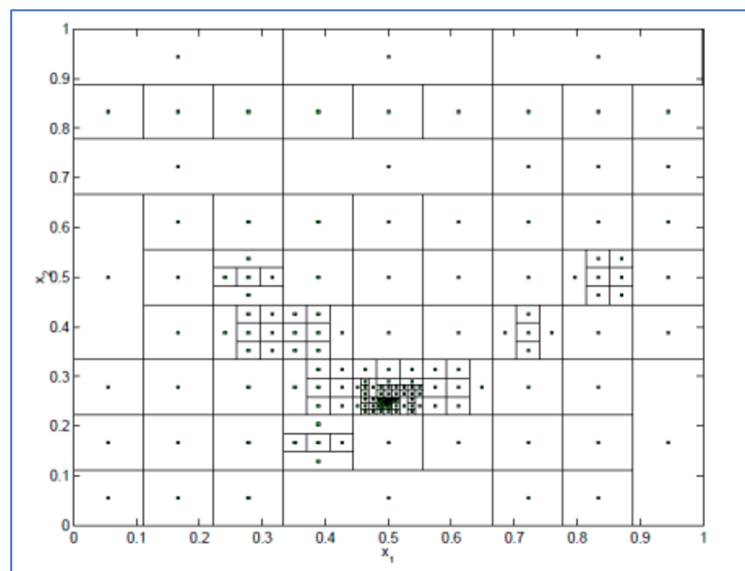
επιπτώσεις του ανέμου και του ρεύματος κ.λπ. στη διαδικασία δρομολόγησης των πλοίων. Πιο πρόσφατα, οι Manarini, et al (2013)[20] έκαναν μια παρουσίαση ενός πρωτότυπου για ένα επιχειρησιακό σύστημα υποστήριξης αποφάσεων δρομολόγησης με βάση έναν τροποποιημένο αλγόριθμο Dijkstra που χρησιμοποιεί ένα χρονικά εξαρτώμενο περιβάλλον. Με βάση τις κατευθυντήριες γραμμές του IMO, η συντομότερη διαδρομή επιτεύχθηκε επιτυχώς με την εφαρμογή περιορισμών ασφαλείας για την αποφυγή του σεφ και της παραμετρικής στρογγυλοποίησης. Ο Eskild(2014)[21] διεξήγαγε επίσης μια έρευνα σχετικά με την εφαρμογή του αλγορίθμου του Dijkstra στη δρομολόγηση πλοίων λόγω καιρού. Επίσης, επισύναψε τους κωδικούς Matlab για το πρόβλημα δρομολόγησης πλοίων στη μεταπτυχιακή της διατριβή που είναι πολύ χρήσιμη για τον ίδιο τύπο έρευνας. Το 2015, οι Senet al[22] χρησιμοποίησαν και πάλι μια μορφή του αλγορίθμου του Dijkstra για να βρουν τη συντομότερη χρονικά διαδρομή πάνω από τον Βόρειο Ινδικό Ωκεανό. Αυτή τη φορά, ανέπτυξαν έναν ευέλικτο αλγόριθμο που λαμβάνει υπόψη σχεδόν όλους τους πρακτικούς περιορισμούς που μπορεί να συναντήσει ένα πλοίο κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Προσδιόρισαν επίσης τις λειτουργίες βάρους, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις ακούσιες όσο και τις αυθόρμητες μειώσεις ταχύτητας. Επιπλέον, οι Chu, et al (2015)[23] ερεύνησαν τον αντίκτυπο των μετεωρολογικών και ωκεανογραφικών συστημάτων πρόβλεψης συνόλου (METOC) για την δρομολόγηση ελάχιστης κατανάλωσης καυσίμου για σκάφη του πολεμικού ναυτικού χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Dijkstra. Επίσης, επισύναψε τους κωδικούς Matlab για το πρόβλημα δρομολόγησης πλοίων στη μεταπτυχιακή της διατριβή που είναι χρήσιμη για τον ίδιο τύπο έρευνας.

### 1.2.5 Άμεση μέθοδος

Η άμεση μέθοδος (direct method) την ανέπτυξαν για πρώτη φορά τα αδέρφια Jonnes, et al (1993)[24] για να βρεθεί το καθολικό ελάχιστο μιας συνάρτησης πολλών μεταβλητών που καθορίζεται σε απλά όρια. Είναι μια διαφοροποίηση της τυπικής Lipschitzian βελτιστοποίησης με τον αλγόριθμο του Schubert[25]. Στην τυπική Lipschitzian προσέγγιση, μια σταθερά Lipschitz θα πρέπει να οριστεί για να καθορίσει πόση μεγάλη έμφαση θα δώσει η βελτιστοποίηση σε ολικό επίπεδο έναντι τοπικού. Ο νέος αλγόριθμος δεν είναι αναγκαίο να το λάβει υπόψη του καθώς ψάχνει το βέλτιστο αποτέλεσμα σε ολικό όσο και σε τοπικό επίπεδο άμεσα και ταυτόχρονα. Κατά συνέπεια, συγκλίνει αρκετά πιο γρήγορα προς τα πεδία λύσεων και γίνεται αρκετά πιο εύκολο να ρυθμιστεί, καθώς πρέπει να προσαρμοστούν λιγότερες παράμετροι. Το όνομα DIRECT αντιπροσωπεύει το Dividing RECTangles, αλλά εκφράζει

έναν τομέα υπερκύβου  $n$ -διαστάσεων για να αναπαραστήσει  $n$  μεταβλητές στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Αρχικά, ο αλγόριθμος καθορίζει ένα σημείο δείγματος στον τομέα αναζήτησης και, στη συνέχεια, θα διαχωριστεί επαναληπτικά 27 τον τομέα από αυτό το συγκεκριμένο σημείο δείγματος καθώς ορίζεται σε επεξεργασία η βελτιστοποίηση. Για την αρχική διαίρεση σε κάθε επανάληψη, κάνει διαίρεση πάντα τον τρέχοντα τομέα σε τρία ίδια μεγέθη υπερκύβων. Όλες οι πληροφορίες στο κεντρικό σημείο κάθε υπερκύβου θα

συγκεντρώνονται για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης και επίσης θα γρησιμοποιηθούν για να καθοριστεί εάν αυτός ο τομέας πρέπει να υποδιαιρεθεί στην τρέχον επανάληψη. Η συγκεκριμένη διαδικασία υπολογίζεται συνεχόμενα μέχρι να πετύχει το βέλτιστο αποτέλεσμα. Με βάση τα πορηγούμενα, ο Finkel (2003) πρότεινε έναν οδηγό χρήσης για να εξηγήσει περαιτέρω πώς ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης DIRECT επιλύει διαφορετικούς τύπους προβλημάτων.



Εικόνα 1-4 Απεικόνιση της μεθόδου DIRECT μετά από πολλές επαναλήψεις (2-διαστάσεις) (Finkel, 2003) <https://www.semanticscholar.org/paper/Global-optimization-with-the-direct-algorithm-Finkel-Kelley/2ba8925266a9f8cce7a0495885f9b47836cc3679>

Αυτή η μέθοδος έγινε εισαγωγή για να λυθεί το πρόβλημα της δρομολόγησης του καιρού από τους Larsson και Simonsen (2014, 2015)[27]. Ανέπτυξαν ένα καινούργιο πρόγραμμα δρομολόγησης καιρού πλοίου που βασίζεται στον αλγόριθμο DIRECT. Έγιναν αρκετές απλές περιπτώσεις δοκιμών για να αξιολογηθεί η δυνατότητα εύρεσης της συντομότερης διαδρομής, αποφυγής εμποδίων και καταιγίδων με βελτιστοποίηση της ταχύτητας, της αξιοποίησης καιρικών συνθηκών για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου και των συνδυασμών τους. Ο αλγόριθμος DIRECT έχει ταχεία παγκόσμια σύγκλιση και δεν υποστηρίζεται αρκετά στο σύστημα δικτύων στο πρόβλημα της δρομολόγησης του καιρού. Ωστόσο, το συγκεκριμένο μοντέλο δεν υλοποίησε ειδική μονάδα πρόσβασης δεδομένων για τον καιρό αλλά έκανε πιο απλό τον τρόπο υπολογισμού της μέγιστης τιμής ύψους κύματος μπορεί να εξασφαλίσει την ασφάλεια του πλοίου. Επιπλέον, ο αλγόριθμος DIRECT χρειάζεται συχνά χρόνο για να προσδιορίσει την τοπική βέλτιστη τιμή, διαδρομής και εφόσον η διάσταση των μεταβλητών θα είναι αρκετά υψηλή, θα αυξήσει τάχιστα την πολυπλοκότητα της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Επιπλέον, η μέθοδος βρίσκεται μόνο σε προκαταρκτικό στάδιο εφαρμογής στο πρόβλημα δρομολόγησης καιρικών φαινομένων και θα πρέπει να υπάρχει περιθώριο για περαιτέρω ανάπτυξη με το συνδυασμό άλλων αλγορίθμων ώστε να ληφθούν υπόψη πιο πρακτικές συνθήκες.

### **1.2.6 Γεννητικοί αλγόριθμοι**

Ένας εξελικτικός αλγόριθμος είναι μια παγκόσμια μέθοδος βελτιστοποίησης εμπνευσμένη από τη βιολογική εξέλιξη. Η εξελικτική διαδικασία θεωρείται στοχαστική. Στο πρώτο στάδιο, ο αλγόριθμος φτιάχνει έναν βασικό πληθυσμό λύσεων τυχαία[28]. Αυτός ο πληθυσμός θα δημιουργήσει περαιτέρω γενιές με τρόπους αναπαραγωγής, μετάλλαξης, ανασυνδυασμού ή φυσικής επιλογής. Μια τιμή καταλληλότητας, καθώς ο μόνος δείκτης αξιολόγησης αποδίδεται σε κάθε άτομο του πληθυσμού. Τα άτομα με υψηλότερες αξίες φυσικής κατάστασης έχουν πιθανότητες να γίνουν γονείς για να δημιουργήσουν την επόμενη γενιά από εκείνα με χαμηλότερες αξίες φυσικής κατάστασης. Μέσω των συνεχών επαναλήψεων, όταν ο υπολογισμός συγκλίνει ή φτάσει στον προδιαμορφωμένο μέγιστο αριθμό παραγωγής, το άτομο που έχει την μέγιστη καταλληλότητα μέσα από την εξελικτική διαδικασία θα επιλεγεί ως η βέλτιστη λύση. Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι έχουν αρκετές ομοιότητες ιδιαίτερα με προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων. Για προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων, μια πιθανή λύση είναι πιθανόν να είναι καλή για έναν συγκεκριμένο στόχο, αλλά υπάρχει περίπτωση να είναι και κακή για άλλους, τότε εντοπίζεται ένα σύνολο παραβιασμένων λύσεων



που παίρνουν όνομα ως βέλτιστο σύνολο Pareto ή σύνολο χωρίς κυριαρχία[29]. Ο εξελικτικός αλγόριθμος επιτυγχάνει μια παγκόσμια αναζήτηση διατηρώντας έναν πληθυσμό που αποτελείται από πιθανές λύσεις μεταξύ των γενεών. Αυτή η προσέγγιση πληθυσμού σε πληθυσμό είναι χρήσιμη για την αναζήτηση του συνόλου βέλτιστων λύσεων Pareto για βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων. Ο εξελικτικός αλγόριθμος επιτυγχάνει μια καθολική αναζήτηση διατηρώντας έναν πληθυσμό που αποτελείται από πιθανές λύσεις ανάμεσα των γενεών. Αυτή η προσέγγιση πληθυσμού για πληθυσμό είναι αναγκαία για να βρεθεί το σύνολο βέλτιστων λύσεων Pareto για να γίνει βελτιστοποίηση πολλών στόχων. Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι έχουν αρκετά κοινές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στη δρομολόγηση του καιρού του πλοίου για την λύση προβλημάτων όπως για παράδειγμα της βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων, στα οποία οι πολλαπλοί στόχοι πιθανόν να είναι ο χρόνος άφιξης, η κατανάλωση καυσίμου, το κόστος και η ασφάλεια αλλά και άλλοι παράγοντες. Η αξιολόγηση των πιθανών διαδρομών γίνεται με βάση μια τιμή καταλληλότητας σε κριτήρια ναυσιπλοΐας, σχεδιασμού και βελτιστοποίησης. Οι Haries and Hinenthal, et al.(2003, 2008)[30] χρησιμοποίησαν έναν γενετικό αλγόριθμο πολλαπλών στόχων (MOGA) για να επιτύχουν μια διαδρομή με ελάχιστη κατανάλωση καυσίμου και επιθυμητό χρόνο άφιξης, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς ασφαλείας.

### **1.2.7 Δυναμικός προγραμματισμός**

Η μέθοδος του δυναμικού προγραμματισμού αναπτύχθηκε πάνω στην αρχή της βελτιστοποίησης του Bilman (Billman, 1952, 1957)[31]. Οι αλγόριθμοι δυναμικού προγραμματισμού γίνονται χρήση συχνά για την ιδανική βελτιστοποίηση. Ένας δυναμικός αλγόριθμος προγραμματισμού αρχικά αναλύει ένα σύνθετο πρόβλημα σε αρκετά πιο απλά υποπροβλήματα και ύστερα αυτά τα υποπροβλήματα θα λυθούν. Με τον συνδυασμό των δευτερευουσών λύσεων τους, θα παρθεί μια συνολική καλύτερη λύση για το δεδομένο πρόβλημα. Στη δρομολόγηση του καιρού, τα υποπροβλήματα είναι δευτερεύουσες διαδρομές, οι οποίες εκπροσωπούνται από «στάδια». Τα στάδια πρέπει να ορίζονται από μονότονα αυξανόμενες μεταβλητές όπως είναι για παράδειγμα ο χρόνος ή η απόσταση στο πρόβλημα δρομολόγησης. Γίνεται εισαγωγή δύο χαρακτηριστικών για να εκφράσουν ένα στάδιο. Η πρώτη είναι μια μεταβλητή ελέγχου που μπορεί να είναι η κατεύθυνση ή η ταχύτητα του πλοίου και το άλλο είναι οι καταστάσεις που περιγράφουν τη γεωγραφική θέση ή ακόμα και την τοπική ώρα ενός πλοίου.

Το υποπρόβλημα είναι η εξαγωγή της βέλτιστης μεταβλητής ελέγχου μεταξύ διαφορετικών καταστάσεων σε ένα στάδιο. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το προηγούμενο στάδιο θα χρησιμοποιηθούν για να υπολογιστεί το επόμενο στάδιο. Ολόκληρος ο υπολογισμός θα ολοκληρώσει αυτή τη διαδικασία από στάδιο σε στάδιο με αναδρομικό αλγόριθμο προς τα πίσω ή προς τα εμπρός μέχρι να καθοριστεί ένα βέλτιστο πλάνο ταξιδιού. Ο Seen (1978)[32] συγκέντρωσε μια προσέγγιση δυναμικού προγραμματισμού με έναν αναδρομικό αλγόριθμο προς τα πίσω στο πρόβλημα της δρομολόγησης πλοίου ελάχιστου κόστους υπό αβεβαιότητα. Ο Bee Wit (1990) έκανε χρήση της μεθόδου δυναμικού προγραμματισμού για την εύρεση της λύσης του προβλήματος του ελάχιστου ρυθμού περιστροφής της έλικας βασίζοντας μια ωκεάνια διαδρομή σταθερού χρόνου πάνω σε ένα σύστημα προκαθορισμένου πλέγματος. Στην έρευνά που έκανε, ο ρυθμός περιστροφής της προπέλας θεωρήθηκε σταθερός κατά την διάρκεια της πλεύσης. Οι James, et al (1991) χρησιμοποίησαν την ίδια μέθοδο για την επίλυση του προβλήματος της δρομολόγησης της ελάχιστης κατανάλωσης καυσίμου πάνω σε ένα τυχαίο υπερατλαντικό πέρασμα. Παρουσίασε ένα νέο μοντέλο για την πρόβλεψη της απόκρισης κίνησης των πλοίων βασισμένο στην πρόγνωση του καιρού και την ισχύς του κινητήρα ορίζεται ως σταθερή κατά τον υπολογισμό του. Πιο λεπτομερής και εκτεταμένη έρευνα παρουσιάστηκε στη διδακτορική του διατριβή (1990)[33]. Παρόμοια με τον Chen, Ο Calvert (1990) επέλεξε επίσης την απόσταση του σκάφους ως μεταβλητή σταδίου και υιοθέτησε τον ανάδρομο αναδρομικό αλγόριθμο στον δυναμικό προγραμματισμό. Δεδομένου ότι η κατεύθυνση του πλοίου είναι η μόνη μεταβλητή ελέγχου, έπρεπε να εξετάσουν μόνο δύο διαστάσεις, το γεωγραφικό πλάτος και το γεωγραφικό μήκος, για την περίπτωση του προβλήματος υπο-δρομολόγησης. Ως εκ τούτου, η μέθοδος θεωρείται δισδιάστατος δυναμικός προγραμματισμός(2DDP). Οι Alligne, Papantoniou και Walters et al (1997, 1998)[34] παρουσίασαν έναν αλγόριθμο ελαχιστοποίησης χρόνου/καυσίμου για τη δρομολόγηση των καιρικών συνθηκών πλοίου που βασίζεται σε δυναμικό προγραμματισμό με τον εμπρός αναδρομικό αλγόριθμο. Χρησιμοποίησαν το χρόνο για μεταβλητή σταδίου και το πιο σημαντικό, έκαναν προσπάθεια να μελετήσουν δύο μεταβλητές ελέγχου τόσο της ισχύς κινητήρα αλλά και της πορείας αποστολής στη διάρκεια που γινόταν η υλοποίησης της

διαδικασίας του δυναμικού προγραμματισμού. Με βάση τα παραπάνω, ο Shao (2012, 2013)[35] ανέπτυξε μια μέθοδο τρισδιάστατου δυναμικού προγραμματισμού (3DP) για να λυθεί το πρόβλημα της δρομολόγησης του καιρού πλοίων, η οποία έχει τρισδιάστατες μεταβλητές: γεωγραφικό πλάτος, γεωγραφικό μήκος και χρόνο για μια κατάσταση, και κάνει χρήση έναν αλγόριθμο προς τα εμπρός στην διαδικασία βελτιστοποίησης. Όπως έγραψε στη διδακτορική του διατριβή, ένας αλγόριθμος τύπου προς τα εμπρός αποδίδει καλύτερα από έναν αλγόριθμο του τύπου προς τα πίσω για πρόβλημα δρομολόγησης καιρού. Επειδή η αρχική ώρα αναχώρησης είναι πάντα σταθερή, ενώ η ώρα άφιξης σε μια τρέχουσα τοποθεσία συνήθως αλλάζει ανάλογα με τη διαφορετική ελάχιστη κατανάλωση καυσίμου.

### **1.3 Πρόβλεψη καιρικών συνθηκών**

Η δρομολόγηση πλοίων βάσει δεδομένων καιρού, όπως ο προγραμματισμός πριν το ξεκίνημα του ταξιδιού παίζει αρκετά σημαντικό ρόλο σε διάφορα συστήματα μεταφορών (Mote et al., 1987, Straton, 1974; Burnet, 2000, Ng et al., 2009, Ρριία-Οσμικρόα et al., 2015, Vetor και Guedes Soares, 2016)[36].[37].[38]. Επιπλέον, υπάρχουν διάφοροι εξωτερικοί παράγοντες που ασκούν σημαντική επιρροή και οι οποίοι είναι οι εξής: τη δρομολόγηση που στηρίζεται πάνω στις καιρικές συνθήκες στη ναυτιλία, όπως είναι η πρόγνωση καιρού πριν την έναρξη του ταξιδιού, οι καιρικές συνθήκες στη διάρκεια του ταξιδιού αλλά και πληροφορίες που έχουν σχέση με την κυκλοφορία των πλοίων (Perrera et al., 2012c), και τέλος οι γνώσεις και η εμπειρία του πλοηγού. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μετεωρολογικές προβλέψεις περιλαμβάνουν τόσο βραχυπρόθεσμες μετεωρολογικές προβλέψεις όσο και μακροπρόθεσμες κλιματικές προβλέψεις υπό διαφορετικά περιβαλλοντικά δεδομένα.

Γενικά, η πρόγνωση του καιρού συνίσταται στην πρόβλεψη της κατάστασης της ατμόσφαιρας για μια δεδομένη τοποθεσία σε μικρότερη περίοδο (π.χ. 5–15 ημέρες) με την ακρίβεια της πρόβλεψης να μειώνεται για χρονικές περιόδους άνω των δέκα ημερών. Οι παγκόσμιες προβλέψεις καιρού αποτυπώνονται με προκαθορισμένα μαθηματικά μοντέλα της ατμόσφαιρας και μετεωρολογικές στατιστικές αναλύσεις από διάφορα μετεωρολογικά ινστιτούτα (Fox and Barrdone, 2002)[39]. Οι προβλεπόμενες συνθήκες ανέμου γίνονται χρήση για την εξαγωγή καιρικών προγνώσεων αναλύοντας διάφορα παγκόσμια μαθηματικά μοντέλα κυμάτων, ανέμου, ωκεάνιου και παλιρροϊκού ρεύματος, πάγου, ατμοσφαιρικής πίεσης και θερμοκρασίας. Θα πρέπει να τονιστεί ότι αυτά τα μαθηματικά μοντέλα τα χρησιμοποιούν ως εργαλεία αριθμητικής πρόβλεψης καιρού για την ανάπτυξη της απαιτούμενης πρόβλεψης με βάση τις τρέχουσες καιρικές συνθήκες. Ένα επιλεγμένο σύνολο τέτοιων παγκόσμιων μοντέλων πρόγνωσης καιρού με τους αντίστοιχους παρόχους μπορεί να συνοψιστεί ως εξής: Μοντέλο Παγκόσμιου Συστήματος Προβλέψεων (GFS), Μοντέλο Παγκόσμιου Συστήματος Αφομοίωσης Δεδομένων (GDAS)NOAA, 2018)[40], Μοντέλο ολοκληρωμένου συστήματος πρόβλεψη (IFS)[41] (ECWF, 2016), και Παγκόσμιο μοντέλο Περιβαλλοντικής Πολυκλίμακα (GEM) (Environment Canada, 2014)[42].

Οι κλιματικές προβλέψεις γενικά υπερσχούν των προβλέψεων. Οι κλιματικές προβλέψεις χρησιμοποιούνται συνήθως για την πρόβλεψη της κατάστασης της ατμόσφαιρας σε μια τοποθεσία για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα(π.χ. αρκετά χρόνια).Μεταβλητές που έχουν σχέση με την ατμόσφαιρα και τη γη (δηλαδή το έδαφος), όπως οι θερμοκρασίες, οι άνεμοι, η κατακρήμνιση έως την υγρασία του εδάφους και οι πληροφορίες συγκέντρωσης του ατμοσφαιρικού όζοντος θεωρούνται ως σύνολα δεδομένων για τέτοιες προβλέψεις. Επιπλέον, ολόκληρη η γη αντιπροσωπεύεται από διάφορα σημεία ανάλυσης πλέγματος σε αυτά τα σύνολα δεδομένων κλίματος με διάφορες μορφές δεδομένων όπως GRIB1/GRIB2: Gridded Binary, netCDF3/netCDF4: Network Common Data Form, HDF4/HDF5[43]: Hierarchical Data Format, Hddf4-EOS2 /HDF5-EOSS5: HDF4-Earth Observing System και GeoTIFF: Γεωαναφερόμενες εικόνες ράστερ. Ως εκ τούτου, όσο και οι βραχυπρόθεσμες μετεωρολογικές προβλέψεις όσο και οι μακροπρόθεσμες κλιματικές προβλέψεις μπορούν να αλληλοσυμπληρώνονται. Ένα σύνολο δεδομένων εμπορικών προγνώσεων καιρού είναι πιθανόν να αποτελείται από διάφορες παραμέτρους καιρού. Όπως είναι σημαντικά ύψη κυμάτων στην περίπτωση συνδυασμού κυμάτων ανέμου και διόγκωσης, μέσες περίοδοι και κατευθύνσεις πρωτογενών κυμάτων, περίοδοι αιχμής και κατευθύνσεις των κυμάτων ανέμου, μέσες

ταχύτητες και κατευθύνσεις ανέμου· ταχύτητες και κατευθύνσεις παλιρροιακού και ωκεάνιου ρεύματος συνθήκες πάγου και θερμοκρασία επιφάνειας.

Οι παραπάνω προβλεπόμενες παράμετροι σε συνδιασμό με όλα τα αντίστοιχα στατιστικά δεδομένα καιρού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή άλλων άγνωστων καιρικών παραμέτρων (Tsujiimoto και Hinnenthal, 2008)[44]. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτές οι καιρικές παράμετροι προέρχονται από παγκόσμιους χάρτες ανέμου, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Επομένως, η ακρίβεια των καιρικών προγνώσεων μπορεί να βελτιωθεί μόνο με υψηλής ποιότητας πληροφορίες ανέμου και κατάλληλα εργαλεία ανάλυσης καιρού. π.χ. ένα αρχικό σφάλμα 16% στις ταχύτητες ανέμου συσσωρεύει ένα τελικό σφάλμα 25–30% στα προβλεπόμενα ύψη κυμάτων (Gemill, 1998). Αρκετές εμπορικές πρωτοβουλίες πρόγνωσης καιρού έχουν εφαρμοστεί και πολλά άλλα προηγμένα μαθηματικά μοντέλα και κάποια εργαλεία ανάλυσης καιρού έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια και έχουν σημειωθεί πρόοδοι στα ραντάρ και στους δορυφόρους για τη βελτίωση της ακρίβειας των προβλέψεων. Έχουν επίσης σημειωθεί πρόοδοι στα ραντάρ, τους δορυφόρους και άλλες τεχνολογίες ανίχνευσης. Άλλες τεχνολογίες ανίχνευσης Εκτός από τις προόδους στα ραντάρ, τους δορυφόρους και άλλες τεχνολογίες ανίχνευσης, η εισαγωγή ισχυρών υπερυπολογιστών έχει επίσης βελτιώσει την ακρίβεια των μετεωρολογικών προβλέψεων.

#### **1.4 Πλοήγηση πλοίων**

Οι πλοηγοί πλοίων κάνουν χρήση από παγκόσμιες μετεωρολογικές προβλέψεις για τον σχεδιασμό διαδρομών πλοίων και αυτή η προσέγγιση μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως δρομολόγηση καιρού (Betor και Tuedes Goarres, 2014a, 2014b, 2056β)[45]. Ωστόσο, ο πραγματικός καιρός υπάρχει περίπτωση να διαφέρει από τις προβλεπόμενες συνθήκες στη διάρκεια του ταξιδιού. Οι πλοηγοί θα πρέπει να εξοπλίζονται με εργαλεία, τεχνικές και εμπειρίες ασφαλούς χειρισμού πλοίων για να μπορούν να αντιμετωπίσουν τέτοιες καταστάσεις. Ωστόσο, η ασφάλεια του χειρισμού του πλοίου απεικονίζεται επίσης ως ένα σημαντικό μέρος της δρομολόγησης του καιρού σε αυτή τη μελέτη, όπου ενδείκνυται, οι ταχύτητες και οι προσανατολισμοί του πλοίου (δηλαδή κατεύθυνση και πορεία) σε σχέση με τις τοπικές καιρικές συνθήκες θα πρέπει να επιλέγονται από τους πλοηγούς.

Οι πλοηγοί πλοίων κάνουν χρήση διάφορων τεχνικών ασφαλούς χειρισμού πλοίων σε σχέση με εμπειρία στην αποφυγή ακραίων καιρικών συνθηκών (Betor and Tueddes Coarres, 2016a, 2016d). Αυτές οι τεχνικές ασφαλούς μεταφοράς έχουν ως αποτέλεσμα καλύτερες συνθήκες ασφάλειας και ευστάθειας των σκαφών με αποτέλεσμα να αποφεύγονται οι συγκρούσεις, την υπερβολική επιτάχυνση και τα επικίνδυνα επίπεδα πίεσης και καταπόνησης του κύτους (δηλ. επιπτώσεις πράσινου νερού). Επιπλέον, οι ίδιες τεχνικές κάνουν πιο σπάνιες τις επιπτώσεις της ναυτίας και άλλων τέτοιων καταστάσεων που σχετίζονται με την υγεία του πληρώματος. Ομοίως, ο ασφαλής χειρισμός του πλοίου μπορεί να διατηρήσει στο ακέραιο την ποιότητα των εμπορευμάτων που μεταφέρονται, την ασφαλή λειτουργία των εργασιών των μηχανημάτων επί του σκάφους και να προσφέρει άνεση στους επιβάτες του σκάφους.

Ο ασφαλής χειρισμός των πλοίων αναγνωρίζεται ως βοηθητικός ρόλος στη δρομολόγηση του καιρού. Επιπλέον, διάφορες λειτουργίες πλοίων (π.χ. από πλοίο σε πλοίο, διάσωση και ανάκτηση, γεώτρηση και βυθοκόρηση, και προσγείωση ελικοπτερου, κ.λπ.) μπορούν επίσης να επωφεληθούν τόσο από τη δρομολόγηση των καιρικών συνθηκών όσο και από τον ασφαλή χειρισμό του πλοίου για τη βελτίωση της επιχειρησιακής ασφάλειας. Τα βήματα υλοποίησης και οι αντίστοιχες προκλήσεις στη δρομολόγηση των καιρικών συνθηκών και στην ασφαλή διαχείριση του πλοίου που σχετίζεται με τη ναυτιλιακή βιομηχανία περιγράφονται αναλυτικά στις ακόλουθες ενότητες.

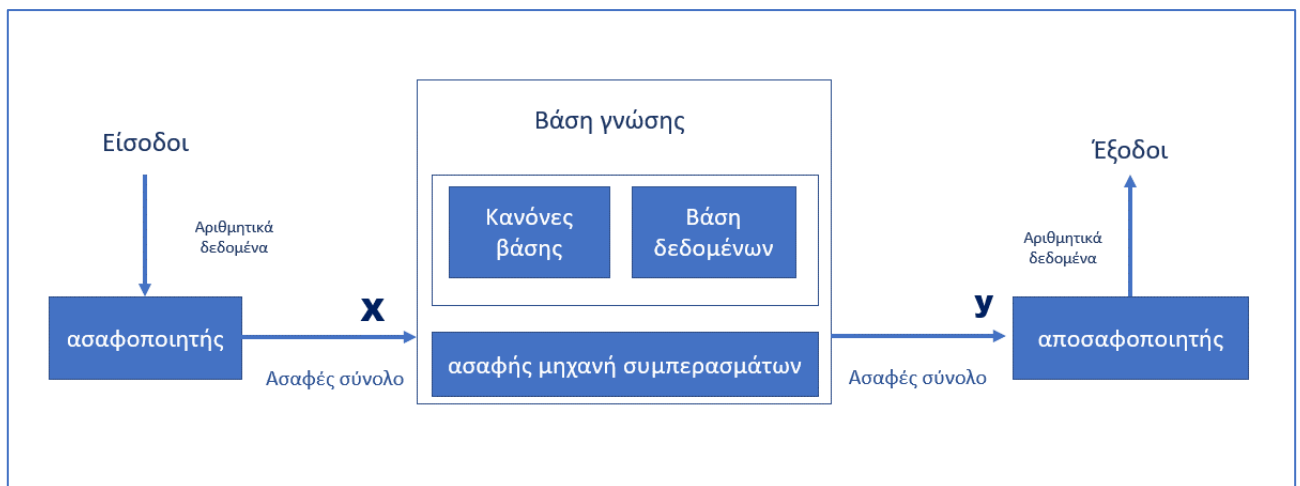
## 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : Ασαφής λογική

Το δεύτερο κεφάλαιο ασχολείται με τη θεωρία της ασαφούς λογικής

### 2.1 Εισαγωγή

Η Ασαφής Λογική αναπτύχθηκε από τον Zadeh[46]. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για μια πολυχρηστική λογική η οποία επιτρέπει τον προσδιορισμό ενδιάμεσων τιμών με τη βοήθεια την κοινότοπης αξιολόγησης (π.χ. Σωστό/Λάθος, Ναι/Όχι, κ.ο.κ). Έννοιες όπως «σχετικά ψηλό» και «πολύ γρήγορο», μπορούν να εκφραστούν με μαθηματικό τρόπο και να γίνει η επεξεργασία τους από υπολογιστή, με σκοπό να εφαρμοστεί ένα περισσότερο "ανθρώπινος" τρόπος σκέψης στον προγραμματισμό. Η ασαφής λογική είναι η τρέχουσα διαδικασία απεικόνισης ενός συνόλου καταχωρημένων μεταβλητών σε παραγόμενα προϊόντα, που βασίζονται σε συγκεκριμένους κανόνες. Η μοντελοποίηση αυτή έχει ως αντικειμενικό στόχο την ανίχνευση κανόνων ασαφούς λογικής

Η προσέγγιση οποιασδήποτε ασαφούς μοντελοποίησης περιλαμβάνει τέσσερις θεμελιώδεις μονάδες όπως απεικονίζονται στην εικόνα. Οι μονάδες αυτές είναι οι εξής : η μονάδα ασαφοποίησης, η βάση γνώσης που αποτελείται από τη βάση δεδομένων και το σύνολο των κανόνων, τη μηχανή ασαφούς συμπεράσματος και τη μονάδα το αποασαφοποιητή.



Εικόνα 2-1 Γενική μορφή συστήματος ασαφούς λογικής με μονάδες ασαφοποιητή και αποασαφοποιητή

Ειδικότερα :

- μονάδα βάσης γνώσης: χρήση κανόνων if-then για τα διαθέσιμα δεδομένα οι οποίοι έχουν κατασκευαστεί από την εξειδικευμένη γνώση. Οι κανόνες αυτοί παρέχουν την

- μετάβαση ανάμεσα στο ασαφές σύνολο εισόδου και εξόδου και κάνουν χρήση συναρτήσεων συμμετοχής τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο.
- ασαφής μηχανή συμπερασμάτων: η έξοδος ενός ασαφούς μοντέλου ορίζεται ως την αλληλουχία βαθμών συμμετοχής κάθε εισόδου στη συνάρτηση συμμετοχής.
- μονάδα αποασαφοποιητή: το αποτέλεσμα παρουσιάζεται ως ένα ασαφές σύνολο το οποίο έχει ασαφοποιηθεί με σκοπό να γίνει υπολογισμός των σαφών τιμών 0 ή 1 που είναι απαραίτητες για τις εφαρμογές(μηχανικές).

## 2.2 Περιγραφή Μοντέλου

Τα μοντέλα ασαφούς λογικής που είναι πολύ γνωστά είναι δύο: η τεχνική του Mamdani και η τεχνική Takagi-Sugeno[47]. Για την περιγραφή του μοντέλου χρησιμοποιείται η δεύτερη τεχνική δηλαδή μοντέλο Takagi-Sugeno μηδενικής τάξης με μία μόνο έξοδο.

Η επιλογή αυτού του μοντέλου στηρίζεται στους εξής λόγους:

- τα μοντέλα αυτά έχουν προσεγγιστικές ιδιότητες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οποιαδήποτε μη γραμμική αναπαράσταση εισροών-εκροών.
- η απεικόνιση εισόδου/εξόδου περιγράφεται με απλές αναλυτικές εξισώσεις οι οποίες με τη σειρά τους οδηγούν σε μία απλή ρύθμιση των παραμέτρων τους.
- ένα σύστημα πολλαπλών εξόδων μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας παράλληλα συστήματα μονής εξόδου.

### 2.2.1 Μονάδα ασαφοποίησης

Στο σύνολο τιμών της μεταβλητής  $x_j$  έχουν μπει αρκετοί γλωσσικοί όροι  $A_j^{k_j}$  (π.χ. «μικρός», «μεσαίος», «βαρύς», ...). Για να εξασφαλιστεί η πληρότητα και η σημασιολογία των κανόνων έχουν χρησιμοποιηθεί τριγωνικές ισχυρές συνεκτικές ασαφείς διαμερίσεις οι οποίες στον χώρο  $U$  για τη μεταβλητή εισόδου  $x_j$  ορίζονται από τη σχέση:

$$\forall x_j \sum_j \mu_{A_j^{k_j}}(x_j) = 1$$



Όπου  $x_j$ ,  $j = \{1, \dots, n\}$  είναι οι  $n$  εισόδοι του μοντέλου,  $A_j^{k_j}$ ,  $k_j = \{1, \dots, m_j\}$  είναι τα  $m_j$  ασαφή σύνολα και  $\mu_{A_j^{k_j}}(x_j)$  είναι ο βαθμός συμμετοχής της εισόδου  $x_j$  στο ασαφές υποσύνολο  $A_j^{k_j}$

Γίνεται επιλογή τριγωνικών συναρτήσεων συμμετοχής για την ισχυρή ασαφή διαμέριση από την ώρα που το πλήθος των παραμέτρων που είναι απαραίτητες να περιγράψουν τη διαμέριση μίας εισόδου είναι το λιγότερο δυνατό. Έτσι η αναγνώριση του ασαφούς μοντέλου θα είναι εύκολη. Όπως παρουσιάζεται και την εικόνα η διαμέριση περιγράφεται συνολικά από την τιμή του  $\{c_{j,1}, \dots, c_{j,m_j}\}$  (τροπικές τιμές των τριγώνων). Η πληρότητα εξασφαλίζεται καθώς το σημείο διασταύρωσης των συναρτήσεων συμμετοχής είναι το . Η σημασιολογία επαληθεύεται από τη συνθήκη  $c_{j,1} < c_{j,2} < \dots < c_{j,m_j}$ .

Το πλήθος των γλωσσικών όρων στη διαμέριση του συνόλου συσχετίζεται με το βαθμό ακρίβειας που με τον οποίο το μοντέλο αναπαρίσταται. Η χρήση της θεωρίας ασαφών συνόλων επιτρέπει στον χρήστη να συμπεριλάβει και να κάνει διαχείριση την ασάφεια των δεδομένων του προβλήματος που καλείται να επιλύσει.

### 2.2.2 Βάση γνώσης

Η βάση δεδομένων περιλαμβάνει την φυσική διαδικασία που πρέπει να απεικονιστεί σύμφωνα με το μοντέλο ασαφούς λογικής. Για την αναγνώριση της διαδικασίας, γίνεται χρήση δυο διαφορετικών βάσεων δεδομένων τα οποία ονομάζονται σύνολο εκπαίδευσης A(training set) και σύνολο ελέγχου(test set) T: Ο ορισμός των δύο συνόλων γίνεται με τον ίδιο τρόπο:

$$(x_m, d(x_m)), \quad m = \{1, \dots, M\}$$

όπου το  $d(x_m)$  είναι η μετρούμενη έξοδος για την διάνυσμα παρατήρησης  $x_m = (x_1 \dots x_n)$ , και το  $M$  είναι το πλήθος των μετρούμενων σημείων. Το σύνολο ελέγχου χρησιμοποιείται από το μοντέλο της ασαφούς λογικής χρησιμοποιείται για την αποτροπή της υπερεκμάθησης (overlearning) του, που θα οδηγούσε στην εξειδίκευση του μοντέλου σε μια συγκεκριμένη περιοχή του χώρου εισόδου.

Η μετάβαση ανάμεσα στο ασαφές σύνολο εισόδου και εξόδου καθορίζεται από μια ομάδα ασαφών κανόνων της μορφής «If-Then». Η γενική μορφή του  $i^{\text{ου}}$  κανόνα ενός συστήματος που αποτελείται από  $N$  κανόνες είναι η εξής:

$$\text{If } x_i \text{ is } A_1^{k_1} \text{ and ... and } x_n \text{ is } A_n^{k_n} \text{ then } y = b^i$$

όπου το  $b^i$  δηλώνει την πραγματική τιμή που προκύπτει από το συμπέρασμα του κανόνα. Τα ασαφή MF εισόδου συνδυάζονται μεταξύ τους μέσω της λογικής πράξης «και» (and).

### 2.2.3 Μηχανή εξαγωγής συμπερασμάτων

Για ένα διάνυσμα εισόδου  $x$  η έξοδος  $y(x)$  ενός μοντέλου Tagaki-Sugeno υπολογίζεται ως ένας σταθμικός μέσος με βάρος τη συνεισφορά του κάθε κανόνα:

$$y(x) = \frac{\sum_{i=1}^N a_i(x) \times b_i}{\sum_{j=1}^N a_j(x)}$$

Όπου  $a_i$  είναι η τιμή πυροδότησης του κανόνα  $I$  για την παρατήρηση  $x$ . Από τη στιγμή που το γινόμενο χρησιμοποιείται ως τελεστής για την τομή των συνόλων, οι τιμές των  $a_i$  και  $y(x)$  υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$a_i(x) = \prod_j^N \mu_{A_j^{k_j}}(x_j)$$

$$y(x) = \sum_j^N a_i(x) \times b^i$$

### 3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Παράμετροι πλοήγησης

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό της πλοήγησης ενός πλοίου.

#### 3.1 Αντίσταση, Αντοχή & Συμπεριφορά πλοίου

Η απόδοση του πλοίου (π.χ. ναυσιπλοΐα και ελιγμοί) μειώνεται υπό διάφορους καιρικούς παράγοντες (π.χ. κύμα, άνεμος, παλίρροια και τρέχουσες συνθήκες) λόγω της αντίστασης του κύτους και των ανεπιθύμητων κινήσεων του σκάφους[48]. Γενικά, η αντίσταση του πλοίου αποτελείται από τέσσερα κύρια στοιχεία: αντίσταση τριβής, υπολειμματική αντίσταση, αντίσταση πρόσθετων κυμάτων και αντίσταση ανέμου. Η αντίσταση τριβής και η υπολειμματική αντίσταση σχετίζεται με το υποβρύχιο τμήμα και η αντίσταση του αέρα συσχετίζεται με το τμήμα πάνω από το νερό του πλοίου. Γενικά, η αντίσταση τριβής αποτελείται από το 70–90% και το 40% της συνολικής αντίστασης σε πλοία χαμηλής και υψηλής ταχύτητας (MAN Diesel and Turbo, 2012), αντίστοιχα. Η αντίσταση τριβής εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα του πλοίου, τον υποβρύχιο όγκο του κύτους και τις επιφανειακές συνθήκες (δηλαδή ρύπανση, διάβρωση και επίστρωση του χρώματος). Η αντίσταση τριβής βελτιστοποιείται στη φάση σχεδιασμού του πλοίου με τον υπολογισμό των κατάλληλων σχημάτων κύτους και κατάλληλων συνθηκών επιφάνειας. Ωστόσο, αυτές οι βέλτιστες συνθήκες είναι πιθανό να υποβαθμιστούν στη φάση λειτουργίας του πλοίου, όπου η ταχύτητα του σκάφους μειώνεται σημαντικά ( Ωκεανογραφικό Ίδρυμα Woods Holle, 1952)[49] λόγω της μεγάλης αύξησης αντίστασης του πλοίου.

Η υπολειπόμενη αντίσταση συνεισφέρει στο 8–25% και στο 40–60% της συνολικής αντίστασης σε πλοία μικρής και μεγάλης ταχύτητας (MAN Diesel and Turbo, 2011), αντίστοιχα[48]. Η υπολειπόμενη αντίσταση (δηλ. κατανομή πίεσης στην επιφάνεια του πλοίου) είναι εξαρτημένη από το προφίλ πίεσης (δηλαδή το προφίλ ροής νερού και τις συνθήκες διαχωρισμού ροής)τριγύρω από το σκάφος. Αυτό το προφίλ πίεσης είναι η κύρια πηγή αντίστασης που δημιουργούν κύματα που υπολογίζεται υπό συνθήκες ελιγμών πλοίου. Παρομοίως, η υπολειπόμενη αντίσταση βελτιστοποιείται κατά τη φάση σχεδιασμού του πλοίου, σχεδιάζοντας κατάλληλα σχήματα κύτους και συνθήκες επιφάνειας. Γενικά, ο συνδυασμός της αντίστασης στην τριβή και της υπολειμματικής αντίστασης του πλοίου θεωρείται ως αντίσταση σε ήρεμο νερό και θα πρέπει επίσης να γίνει μείωση για να την βέλτιστη απόδοση του πλοίου.

Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί επιλέγοντας κατάλληλες ταχύτητες σκάφους στη ναυσιπλοΐα πλοίων.

Τα σκάφη παρουσιάζουν πρόσθετη αντίσταση πλοίων λόγω των κυμάτων του ωκεανού. Αυτή η πρόσθετη αντίσταση λόγω των κυμάτων συνάντησης εισάγει διάφορες δυνάμεις στο κύτος του σκάφους (Matulja et al., 2011): η δύναμη ολίσθησης λόγω των προσπιπτόντων κυμάτων και των κυμάτων που δημιουργούνται από την ανύψωση και τη ρίψη, η δύναμη απόσβεσης λόγω της ανύψωσης και της ρίψης και η δύναμη περίθλασης λόγω των αλληλεπιδράσεων μεταξύ του σκάφους και των κυμάτων που συναντούν. Αυτές οι δυνάμεις επηρεάζονται επίσης από τις ταχύτητες του πλοίου και τις αντίστοιχες θαλάσσιες συνθήκες (π.χ. ύψος κύματος, γωνία κύματος και μήκος/περίοδος), όπου τα εμφανή κύματα από το προσκήνιο μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την πρόσθετη αντίσταση του πλοίου. Επιπλέον, η περιοδική εμφάνιση των κυμάτων στην επιφάνεια του πλοίου επηρεάζει προσθετικά την ταχύτητα του, έτσι πρέπει να την λάβουμε και αυτή την παράμετρος υπ' όψη στις συνολικές απώλειες της ταχύτητας του σκάφους. (IMO, 2006)[50]. Τα πλοία έρχονται αντιμέτωπα επίσης με διάφορες ανεπιθύμητες κινήσεις λόγω των κυμάτων που συναντάνε και που μειώνουν την προωστική απόδοση του σκάφους. Ως εκ τούτου, οι συνθήκες κυμάτων τριγύρω από τα πλοία θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για προσεγγίσεις δρομολόγησης καιρού και ασφαλούς χειρισμού πλοίων, όπου οι αντίστοιχες επιδράσεις των κυμάτων θα πρέπει να ελαχιστοποιούνται (Pereira et al., 2015)[51]. Η αντίσταση στον άνεμο συμβάλλει στο 2-10% της συνολικής αντίστασης του πλοίου (MAN Diesel and Turbo, 2012) και σχετίζεται με τις ταχύτητες των σκαφών, τα σχήματα και τις περιοχές υπερκατασκευών και τις ταχύτητες και τις κατευθύνσεις του ανέμου. Η αντίσταση στον άνεμο λαμβάνεται επίσης υπόψη στις προσεγγίσεις δρομολόγησης των καιρικών συνθηκών και ασφαλούς χειρισμού του πλοίου, όπου οι αντίστοιχες επιπτώσεις του ανέμου στη ναυσιπλοΐα του πλοίου θα πρέπει να ελαχιστοποιηθούν.

Μια γενική συζήτηση για την αντίσταση του πλοίου παρουσιάζεται παραπάνω. Μια απλοποιημένη δομή αντίστασης πλοίου θα πρέπει να εφαρμοστεί σε εφαρμογές τύπου δρομολόγησης καιρού για να γίνει μείωση στις αντίστοιχες υπολογιστικές πολυπλοκότητες. Θεωρείται ότι η βελτιστοποίηση των διαδρομών του πλοίου σε σχέση με τα κύρια στοιχεία αντίστασης του πλοίου μπορεί να ελαχιστοποιήσει άλλες ανεπιθύμητες κινήσεις του πλοίου.

Η αντίσταση του πλοίου που αναφέρθηκε παραπάνω είναι εξαρτημένη επίσης από τις συνθήκες που φορτώνουν το σκάφος επειδή τα υποβρύχια και πάνω από το νερό τμήματα συσχετίζονται με τα εμπρός και τα πίσω ρεύματα. Ως εκ τούτου, ο υπολογισμός της αντίστασης

του πλοίου γίνεται επίσης σε σχέση με διάφορες συνθήκες φόρτωσης (π.χ. συνθήκες φορτίου και έρματος) σε εφαρμογές τύπου δρομολόγησης καιρού. Γενικά, για την εκτίμηση τέτοιων τιμών αντίστασης πλοίου, σε πρώτη φάση γίνεται χρήση πειραμάτων πλήρους κλίμακας και μοντέλου και αριθμητικών μοντέλων/ τεχνικές. Σε πειράματα πλήρους κλίμακας, γίνονται θαλάσσιες δοκιμές κάτω διάφορες καιρικές συνθήκες (δηλ. συνθήκες ήρεμης και θαλασσοταραχής) ISO19019, 2005) για την επαλήθευση τέτοιων αποτελεσμάτων. Σε ένα πείραμα κλίμακας μοντέλων, τα μοντέλα geosim των ίδιων σκαφών δοκιμάζονται υπό συνθήκες δεξαμενής ρυμούλκησης και μέσω των αποτελεσμάτων της δοκιμής μπορούν επίσης να επεκταθούν και σε σκάφη πλήρους κλίμακας. Τα εν λόγω αριθμητικά μοντέλα/τεχνικές προέρχονται από φυσικούς νόμους και οι ικανότητές τους ναυσιπλοΐας και ελιγμών εκτιμώνται κάτω από διάφορα φάσματα ωκεάνιων κυμάτων, όπου στα ίδια αποτελέσματα γίνεται εξαγωγή σε πλοία πλήρους κλίμακας.

### **3.2 Άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες**

Άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες στη ναυσιπλοΐα των πλοίων κατηγοριοποιούνται ως: ωκεάνια και παλιρροιακά ρεύματα, ομίχλη, θερμοκρασία επιφάνειας και συνθήκες πάγου. Παρόλο που τα ωκεάνια και παλιρροιακά ρεύματα έχουν αργή κίνηση σε σχέση με τις συνθήκες ανέμου και κυμάτων και αυτό μπορεί να συμβάλει στις μέσες ταχύτητες και τις συνθήκες πορείας των σκαφών. Ακόμη, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συνθηκών κυμάτων, ανέμου, ωκεανού και παλιρροιακού ρεύματος είναι ικανές να δημιουργήσουν περίπλοκες καταστάσεις ναυσιπλοΐας πλοίων, π.χ. ακολουθώντας ωκεάνια ρεύματα σε μια επιφάνεια κύματος μπορεί να αυξήσει τα μήκη κύματος, να ελαττώσει τα ύψη κύματος και τα κύματα θραύσης και αντίστροφα. Κατά συνέπεια, τα πλοία μπορεί να έρθουν αντιμέτωπα με ανεπιθύμητους ελιγμούς πλοίων σε τέτοιες καταστάσεις και να ελαττώσουν τις ταχύτητες τους, σημαντικά.

Από τις συνθήκες ομίχλης προκύπτουν προβλήματα ορατότητας στη ναυσιπλοΐα των πλοίων και επίσης ελαττώνουν τις ταχύτητες των σκαφών. Αυτές οι συνθήκες χαμηλής ορατότητας παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο σε πολλές καταστάσεις σύγκρουσης πλοίων και παραλίγο σύγκρουσης (van Bannen and Drandsen, 1988; Ferreira et al., 2001, 2012a). Η θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας και οι συνθήκες πάγου προστίθενται ως καιρικοί παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά τη ναυσιπλοΐα των πλοίων, εξίσου σημαντικά στις περιοχές του αρκτικού τύπου. Η χαμηλή θερμοκρασία επιφάνειας είναι ικανή να δημιουργήσει

κρυστάλλους πάγου στο θαλασσινό νερό και να συμβάλλει στην πρόσθετη αντίσταση του πλοίου και σε διάφορες επικίνδυνες καταστάσεις ναυσιπλοΐας, όπου θα πρέπει να δοθεί προτεραιότητα στην ασφάλεια της ναυσιπλοΐας (δηλαδή το σπάσιμο πάγου) στα πλοία. ABS, 2009). Τέτοιες συνθήκες πάγου μπορεί να είναι επικίνδυνες για τα πλοία λόγω του πάχους τους που κατηγοριοποιείται σε δύο τύπους (Bowditch, 2002): αιωρούμενος πάγος και πάγος καταστρώματος. Γενικά, η καθαρή αντίσταση σε κατάσταση πάγου έχει σχέση με την ταχύτητα του πλοίου ( ITTC, 2002) και οι αντίστοιχες δυνάμεις είναι ικανές να αμφισβητήσουν την αντοχή του κύτους και τα όρια κόπωσης του σκάφους. Ενώ τα σκάφη κινούνται σε συνθήκες χαμηλής επιφανειακής θερμοκρασίας, θα πρέπει να γίνεται αποφυγή από πιθανές συναντήσεις με θαλάσσιο πάγο (δηλ. επικίνδυνες καταστάσεις σύγκρουσης). Επί πλέον, η θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας μπορεί να έχει σχέση με τα ωκεάνια και παλιρροιακά ρεύματα, επομένως αυτό μπορεί να ανεβάσει περαιτέρω την αντίσταση του πλοίου. Ωστόσο, οι πληροφορίες που παίρνουμε για τη θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας και τις συνθήκες πάγου χρησιμοποιούνται σχετικά λιγότερο σε καταστάσεις ναυσιπλοΐας πλοίων σε σύγκριση με άλλες παραμέτρους.

Αυτοί οι καιρικοί παράγοντες επηρεάζουν σημαντικά την αντίσταση του πλοίου και μειώνουν την ταχύτητά του. Η απόδοση του πλοίου σε αυτές τις καταστάσεις συχνά υπολογίζει την ταχύτητα προώθησης (SOA) και είναι ικανή να κατηγοριοποιηθεί ως η ταχύτητα που έχει την δυνατότητα να επιτύχει το σκάφος σε μια περιστροφή άξονα (δηλ. ταχύτητα έλικας) χωρίς εξωτερικές δυνάμεις. Οι δύσκολες συνθήκες του ωκεανού μειώνουν το SOA και επίσης οδηγούν σε επικίνδυνες καταστάσεις ναυσιπλοΐας πλοίων (δηλ. απώλεια ικανότητας ελιγμών και ασταθές σύστημα διεύθυνσης) (Perera and Guedes Soares, 2012β). π.χ. ένα κρουαζιερόπλοιο κλάσης Virginia είναι ικανό να κάνει 25 κόμβους σε ήρεμες συνθήκες νερού μπορεί να μειώσει 10–17 κόμβους σε κατάσταση θάλασσας 7 (Kehooe et al., 1973). Επομένως, ο βασικός στόχος στις προσεγγίσεις δρομολόγησης καιρού και ασφαλούς χειρισμού πλοίων είναι η μείωση τέτοιων επιπτώσεων που έχουν σχέση με τις καιρικές συνθήκες στη ναυσιπλοΐα των πλοίων.

### **3.2.1 Θαλάσσιες δοκιμές**

Οι καιρικές επιπτώσεις στα πλοία συχνά εντοπίζονται ρεαλιστικά σε θαλάσσιες δοκιμές. Οι συνθήκες ανέμου και κυμάτων είναι οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τις διακυμάνσεις της ταχύτητας του πλοίου, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Οι συνθήκες κεφαλιού ανέμου και κυμάτων ελαττώνουν την ταχύτητα του πλοίου και οι συνθήκες ανέμου και κυμάτων μπορεί να βελτιώσουν ελάχιστα την ταχύτητα του πλοίου σε κάποιες καταστάσεις πλοήγησης (δηλ. ο

άνεμος και τα κύματα είναι ικανά να παρέχουν δυνάμεις υποστήριξης). Γενικά, οι συνθήκες έντονου ανέμου και κυμάτων ελαττώνουν την ώθηση της έλικας και αυξάνουν την αντίσταση από τις διορθώσεις που κάνει η διεύθυνση του σκάφους. Ως εκ τούτου, οι προβλέψεις κυμάτων και ανέμων στη διάρκεια του ταξιδιού είναι ένα ουσιαστικό κομμάτι για την πρόβλεψη ακριβών ταχυτήτων και κινήσεων του πλοίου (δηλαδή ανύψωση, βήμα και κύλιση). Διάφορες σχέσεις μεταξύ της αντίστασης, της ταχύτητας και της ισχύος του πλοίου εμφανίζονται στις πρόσφατες μελέτες για να προβλέψουν την απόδοση του πλοίου. Η απόδοση του πλοίου αξιολογείται επίσης με την αφαίρεση των φαινομένων κυμάτων και ανέμου με διάφορες αριθμητικές τεχνικές, όπου προκύπτουν τα αντίστοιχα διαγράμματα ταχύτητας-ισχύς σε καταστάσεις ήρεμου νερού. Αυτές οι σχέσεις (π.χ. ταχύτητα σκάφους, ισχύς κινητήρα και αντίσταση πλοίου) αναπτύσσονται πρωταρχικά από τους σχεδιαστές πλοίων στο πλαίσιο υπολογιστικών προσομοιώσεων. Τα ίδια αποτελέσματα επαληθεύονται κάτω από πειράματα μοντέλων και πραγματικά θαλάσσια μονοπάτια. Αυτές οι θαλάσσιες δοκιμές συχνά συνιστώνται στη μέτρηση της απόδοσης της ταχύτητας ισχύος του πλοίου κάτω διάφορες συνθήκες κυμάτων και ανέμου που εκτελούνται υπό διάφορες οδηγίες, υιοθετημένες συστάσεις και πρότυπα που αναπτύχθηκαν από τον IMO και άλλους νηογνώμονες. ITTC, 2004a; MAPIN, 2005; ISO 1516, 2001)[52][53].

Οι δοκιμές μοντέλων και οι δοκιμές στη θάλασσα εκτελούνται συχνά κάτω από συνθήκες ήρεμου νερού ως δοκιμές ελιγμών, όπου γίνεται υπολογισμός της απαιτούμενης ισχύος/ώσης πλοίου για συγκεκριμένες ταχύτητες πλοίου (δηλ. SOA). Από την άλλη πλευρά, τα ίδια αποτελέσματα του πειράματος μπορούν να επεκταθούν σε δύσκολες καιρικές συνθήκες, όπου αναμένονται μειώσεις της ταχύτητας του σκάφους λόγω της αντίστασης του πλοίου, του φορτίου του κινητήρα και των διακυμάνσεων της απόδοσης της πρόωσης. Η ναυσιπλοΐα του πλοίου υπό σημαντικές συνθήκες ανέμου και κυμάτων προσδιορίζεται ως θαλάσσια, όπου μπορούν να παρατηρηθούν διάφορες αλληλεπιδράσεις μεταξύ της ταχύτητας του πλοίου, των κινήσεων του πλοίου και των καιρικών συνθηκών. Τα δεδομένα επιδόσεων και πλοήγησης του πλοίου υπό διάφορες καιρικές συνθήκες συλλέγονται από αισθητήρες επί του σκάφους και συστήματα συλλογής δεδομένων για να παρατηρηθούν οι πραγματικές δυνατότητες διατήρησης της θάλασσας των πλοίων σε αυτές τις καταστάσεις. Ωστόσο, υπάρχουν πολλές προκλήσεις που πρέπει να παρατηρηθούν σε αυτού του είδους δεδομένα (Blikema, 2009)[54] π.χ. τα φαινόμενα διασποράς δεδομένων εξαιτίας δύσκολων καιρικών συνθηκών. Ωστόσο, αναμένεται ότι οι προσεγγίσεις δρομολόγησης καιρού και ασφαλούς χειρισμού πλοίου μπορούν να μειώσουν αυτές τις αλληλεπιδράσεις που έχουν σχέση με τις καιρικές συνθήκες, όπου μπορεί επίσης να γίνει καλύτερη η ποιότητα της απόδοσης του πλοίου και των δεδομένων πλοήγησης.

### 3.2.2 Χειριστής πλάτους απόκρισης(Response amplitude operator)

Οι συνθήκες ναυσιπλοΐας των πλοίων αναλύονται με βάση την απόκρισή τους σε κανονικά και ακανόνιστα κύματα. Τα ακανόνιστα κύματα αποτελούνται από αρκετά ύψη κύματος, περιόδους συνάντησης και γωνίες που σχετίζονται με την πορεία του πλοίου αλλά και τις συνθήκες πορείας. Ως εκ τούτου, τα πλοία μπορούν να αντιμετωπίσουν ανεπιθύμητες κινήσεις του πλοίου κάτω από τέτοιες καιρικές συνθήκες (δηλ. δύσκολες καιρικές συνθήκες) και αυτές μπορεί να μην είναι έτοιμες να τις ελαττώσουν με το πηδάλιο και τα συστήματα ελέγχου πρόωσης. Επιπλέον, η δυναμική του πλοίου συχνά κατατάσσεται ως ένα υπο-ενεργοποιημένο σύστημα, το οποίο έχει μη επαρκείς ενεργοποιήσεις πηδαλίου και έλικας για την πραγματοποίηση κατάλληλων ελιγμών. Η απώλεια ελιγμού του σκάφους αλλά και η κατάσταση πιθανούς ανατροπής του κάτω από δύσκολες καιρικές συνθήκες (Berrera and Fueddes Sooaes, 2011a, 2013b) μπορεί να οδηγήσει αυτά τα σκάφη σε απώλεια ελέγχου. Για να αποφευχθούν αυτοί οι τύποι επικίνδυνων καταστάσεων πλοήγησης, μελετώνται οι κινήσεις του πλοίου με χειριστές πλάτους απόκρισης (RAO) κάτω από διάφορες ομάδες κυμάτων.

Τα RAO είναι χρήσιμα στην σωστή αξιολόγηση των κινήσεων των σκαφών στη σχεδίαση του πλοίου, όπου μπορούν να προσομοιωθούν οι αποκρίσεις του πλοίου υπό επιχειρησιακές ταχύτητες και οι αναμενόμενες θαλάσσιες καταστάσεις. Ως εκ τούτου, η πιθανή συμπεριφορά του σκάφους σε διάφορες ομάδες κυμάτων (δηλ. σημαντικό ύψος κύματος, περίοδοι συνάντησης και γωνίες) μπορεί να εντοπιστεί και μπορούν επίσης να γίνει εισαγωγή



κατάλληλων τροποποιήσεων σχεδιασμού και λειτουργικοί περιορισμοί για να αποφύγουμε την κύλιση, την ανατροπή και άλλων επικίνδυνων καταστάσεων. Επιπλέον, σε αυτό το σημείο μπορούν επίσης να εντοπιστούν διάφοροι περιορισμοί ασφαλείας (π.χ. κύλιση, ανατροπή και άλλες επικίνδυνες συνθήκες) στα πλοία και ότι οι πληροφορίες πρέπει να τονιστούν στα εγχειρίδια λειτουργίας του πλοίου. Τα RAO πλοίων προέρχονται από διάφορες μαθηματικές θεωρίες και υπολογιστικές τεχνικές (π.χ. μέθοδοι θεωρίας ταινιών, μέθοδοι πάνελ και διάφορους κώδικες υπολογιστικής δυναμικής ρευστών). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι ίδιες μέθοδοι μπορούν επίσης να αποτελούν μέρος των υπολογισμών αντίστασης πλοίου. Παρόλο που οι υπολογισμοί RAO βασίζονται σε μεθόδους που βασίζονται στη θεωρία ταινιών (Salvesen et al., 1970)[55], μέθοδοι πάνελ με τρισδιάστατη ροή τριγύρω από το κύτος των σκαφών εμφανίζονται επίσης στη βιβλιογραφία (Nohlmos et al., 2001)[56]. Σε αυτούς τους υπολογισμούς απορροφώνται επίσης μη γραμμικοί συντελεστές απόσβεσης στους ελιγμούς του πλοίου για τη βελτίωση της ακρίβειας (Odgest, 2008)[57] και τα αποτελέσματα επαληθεύονται από πειράματα κλίμακας μοντέλων κάτω διάφορες συνθήκες θαλάσσης (Baynne et al., 2005)[58]

### **3.3 Ισχύς Πλοίου**

Η αντίσταση του πλοίου και οι ανεπιθύμητες κινήσεις του σκάφους επηρεάζουν σε υπερβολικές απαιτήσεις ισχύος με μεγάλη κατανάλωση καυσίμου. Γενικά, η κατανάλωση καυσίμου καυσίμου σε ένα σκάφος μπορεί να πλησιαστεί με την τρίτη ισχύ της ταχύτητας πλοήγησής του (Sujimoto et al., 2008)[59] και πρόσθετες απώλειες ισχύος λόγω των μη επιθυμητών κινήσεων του πλοίου θα πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη σε αυτούς τους υπολογισμούς. Αναμένεται ότι οι μέσες ταχύτητες των πλοίων στα πλοία θα ελαττωθούν σημαντικά στο μέλλον. Η αργή ταχύτητα του σκάφους σε συνδιασμό με συνθήκες χαμηλής κίνησης χαμηλώνουν τις απαιτήσεις ισχύος του πλοίου, επομένως έχει την δυνατότητα να μεταφερθεί περισσότερο φορτίο (Baggiou et al., 1992)[60] σε σκάφη. Ωστόσο, οι χαμηλές ταχύτητες των πλοίων μπορούν να κάνουν μεγαλύτερη τη διάρκεια του ταξιδιού και να δημιουργήσουν επιπλέον κόστος πλοήγησης (δηλ. χρεώσεις ναύλωσης και αποθήκευσης). Επομένως, αυτές οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ της αντίστασης του πλοίου, των κινήσεων του πλοίου, του χειρισμού φορτίου, των διαμορφώσεων κινητήρα-προώσεως, των καιρικών συνθηκών και της κατάλληλης διάρκειας του πλου (δηλ. χρόνος ταξιδιού) θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για τη βέλτιστη απόδοση του σκάφους. Οι συγκεκριμένες αλληλεπιδράσεις εξετάζονται σε δύο κύριες ενότητες, τη δρομολόγηση των καιρικών συνθηκών και τον ασφαλή χειρισμό πλοίων, σε αυτή τη μελέτη ως κύρια συμβολή.

## 4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : Συστήματα αυτόνομης πλοήγησης – Εταιρίες

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο ασχολείται με τα διαθέσιμα συστήματα αυτόνομης πλοήγησης καθώς και με τις εταιρίες που τα αναπτύσσουν και τα διαθέτουν στην παγκόσμια αγορά της ναυτιλίας.

### 4.1 NAPA

Η εταιρία NAPA[61] για πάνω από 31 χρόνια λειτουργίας της έχει αναδειχτεί στις πρώτες θέσεις των εταιριών που έχουν ως κύριο στόχο την ανάπτυξη υπηρεσιών και διαχειρίζονται την ανάλυση δεδομένων για μια ασφαλέστερη, εξυπνότερη και πιο βιώσιμη ναυτιλιακή βιομηχανία. Η έδρα της εταιρίας είναι η Φινλανδία και έχει υπό τις οδηγίες της 190 άτομα στους τομείς της ναυτικής αρχιτεκτονικής, της ναυτιλίας και της τεχνολογίας των πληροφοριών. Ο Όμιλος NAPA δραστηριοποιείται σε παγκόσμια κλίμακα και έχει παρουσία στην Ιαπωνία, την Κορέα, την Κίνα, τη Σιγκαπούρη, τις ΗΠΑ, τη Γερμανία, την Ελλάδα, τη Ρουμανία και την Ινδία. Μέχρι και σήμερα, η NAPA έχει 420 οργανισμούς για τις σχεδιαστικές της λύσεις, σχεδόν 3.000 εγκαταστάσεις σε πλοία και έναν αυξανόμενο αριθμό συνδρομητών για τις υπηρεσίες του στόλου της. Από το ξεκίνημά της ως μονάδα μικρής επιχείρησης στο ναυπηγείο Bärtsillä στη Φινλανδία στα μέσα 1970, μέχρι να γίνει μια πραγματικά παγκόσμια εταιρεία με σχεδόν 200 υπαλλήλους σε δέκα χώρες σε όλο τον κόσμο.

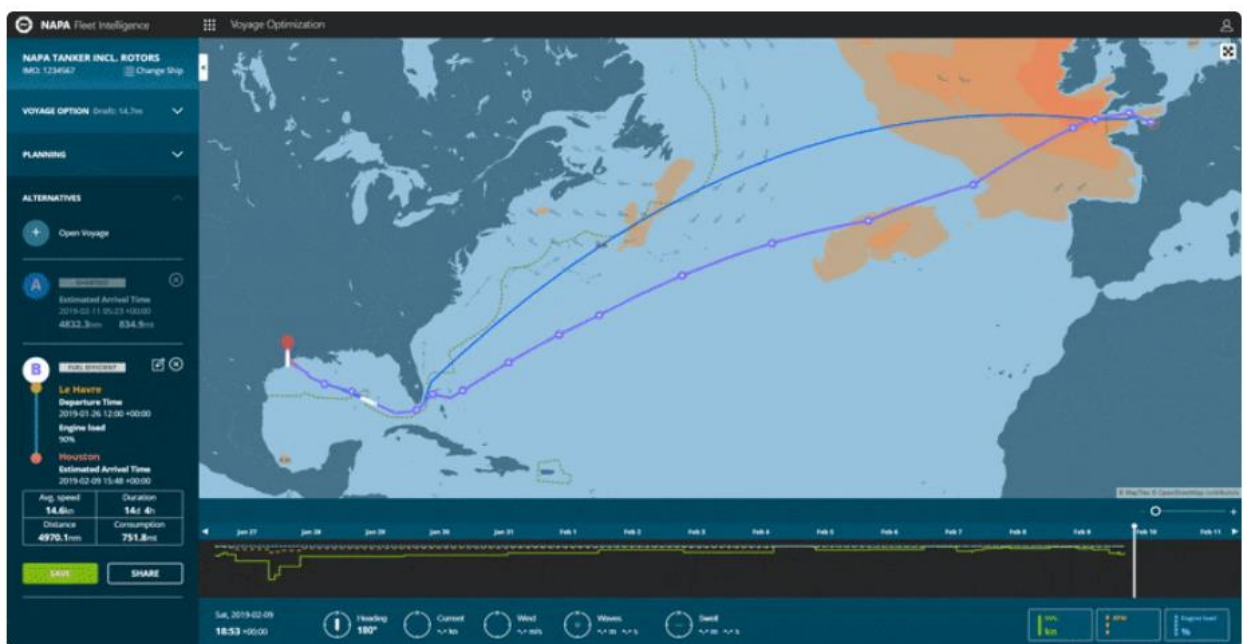


Εικόνα 4-1 Λογότυπο της εταιρίας NAPA

#### 4.1.1 NAPA Voyage Optimization

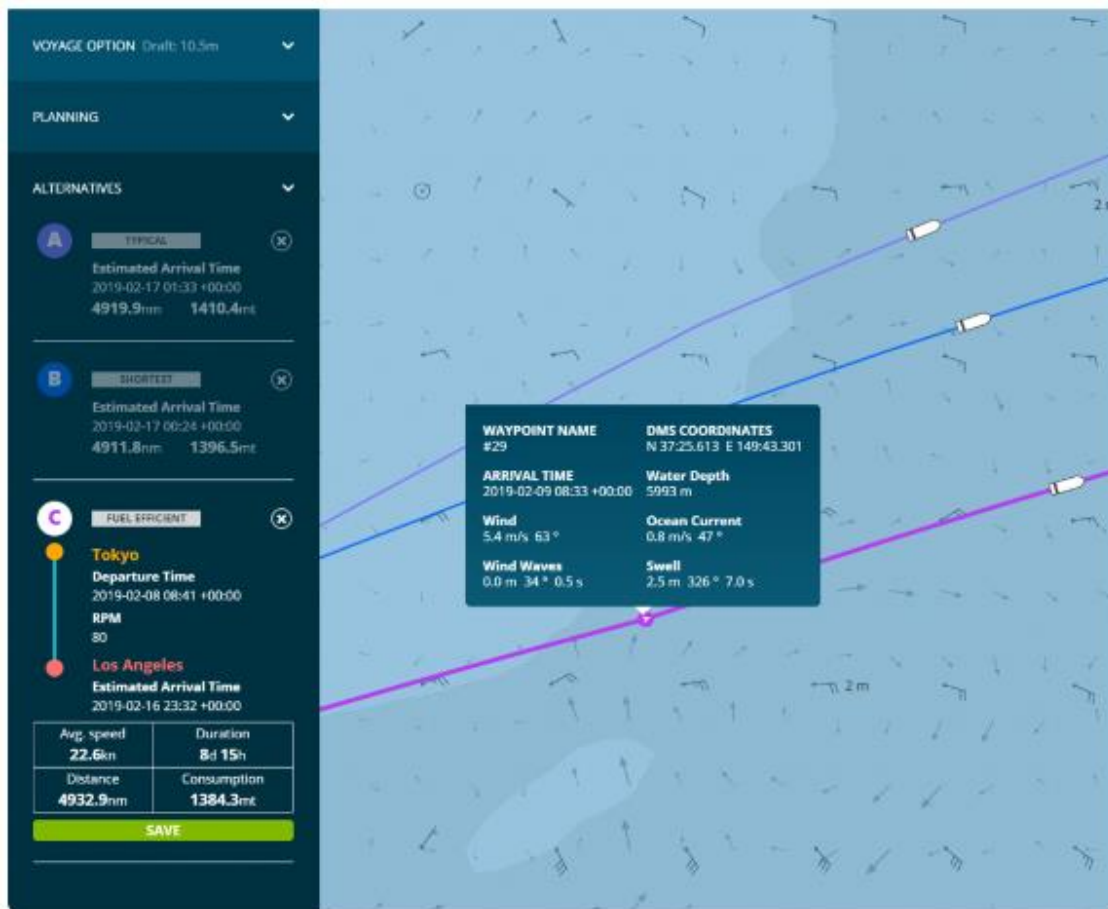
Το NAPA Voyage Optimization[62] ανήκει στην κατηγορία των λογισμικών της εταιρίας που βελτιστοποιούν τα θαλάσσια ταξίδια και λαμβάνει υπόψην τόσο τις προδιαγραφές του πλοίου όσο και τις καιρικές συνθήκες στη διάρκεια του ταξιδιού. Το εν λόγω λογισμικό είναι φιλικό προς τον τελικό χρήστη και δεν χρειάζεται εγκατάσταση καθώς εκτελείται μέσω ενός τυπικού προγράμματος περιήγησης στο διαδίκτυο.

Ανάμεσα στα βασικά του χαρακτηριστικά είναι η πλοήγηση βάσει των καιρικών συνθηκών όπως είναι η ταχύτητα του ανέμου, το ύψος κυματισμών και σάλος (swell) που εμφανίζουν, ύπαρξη τροπικών καταιγίδων και επιπλέον όρια ασφαλείας που πιθανόν υπεισέρχονται στον πλου του σκάφους. Επίσης προσφέρει επιλογές για τον τύπο του ταξιδιού, όπως συντομότερος χρόνος άφιξης, σταθερή ταχύτητα πλου, σταθερές στροφές της μηχανής του πλοίου βελτιστοποίηση του φορτιού της μηχανής, μεγιστοποίηση ημερήσιου κέρδους για το ταξίδι αλλά και ελαχιστοποίηση του κόστους του.

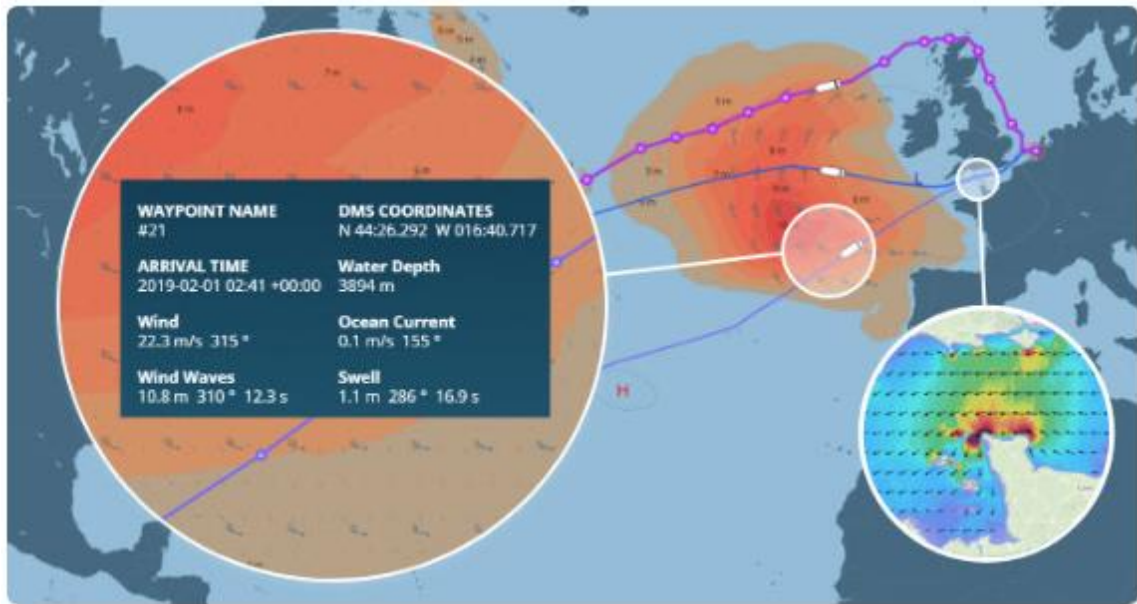


Εικόνα 4-2 Στιγμιότυπο οθόνης NAPA Voyage Optimization

Η απόδοση του πλοίου υπολογίζεται με τη χρήση του NAPA performance model το οποίο επίσης λειτουργεί σε σκάφη με μερική πρόωση μέσω ιστίων. Δίνει την δυνατότητα παροχής πολλών εναλλακτικών διαδρομών που έχει ως αποτέλεσμα ο τελικός χρήστης να τις συγκρίνει και να επιλέγει αυτή που θεωρεί βέλτιστη για το σκάφος του. Το λογισμικό λαμβάνει υπόψιν του διαφορετικούς τύπους καυσίμων και για καθένα από αυτά το κόστος τους και τους ρύπους που εκλύουν για την πλεύση σε διαφορετικές περιοχές με ελεγχόμενη εκπομπή ρύπων (Emission Control Areas – ECAs).



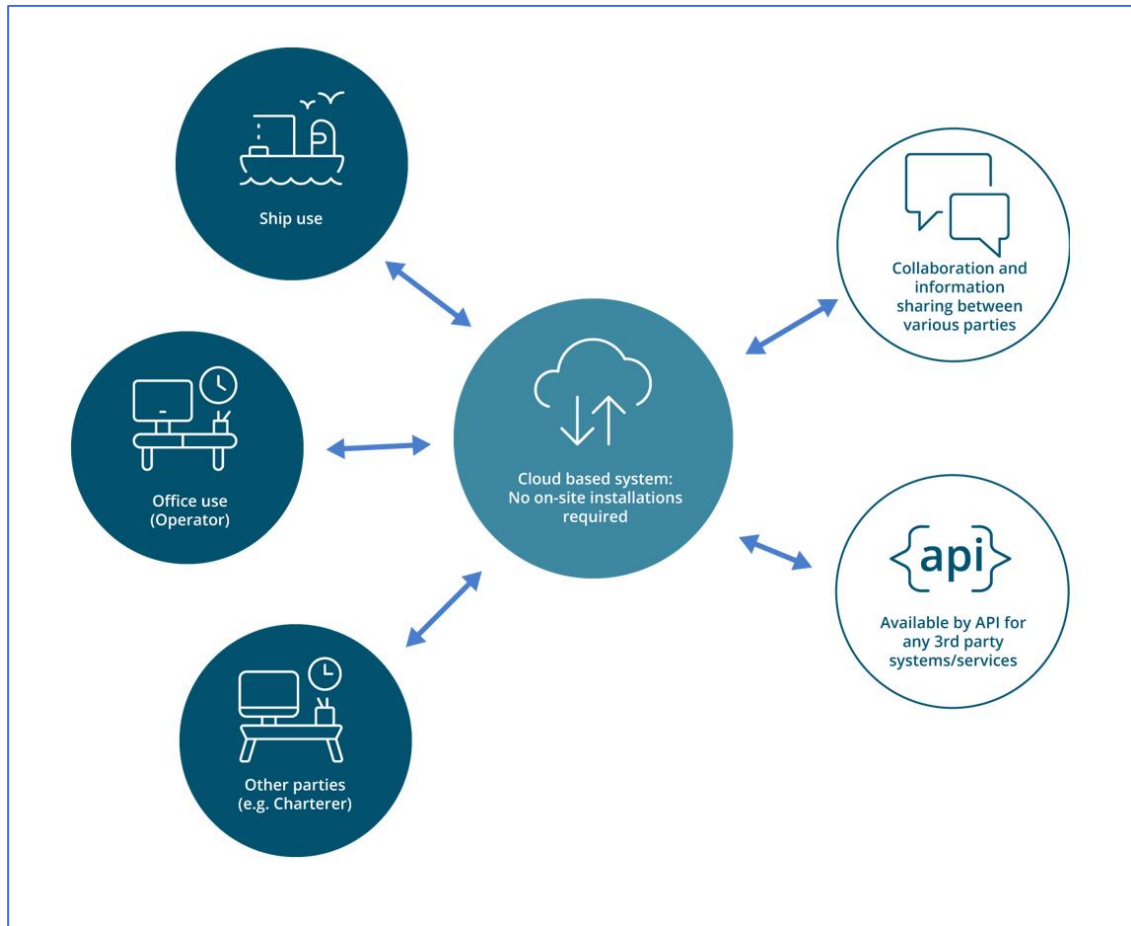
Εικόνα 4-3 Περίπτωση χρήσης- εναλλακτικές διαδρομές



Εικόνα 4-4 Πληροφορίες καιρικών συνθηκών - απεικόνιση στο χάρτη πλοήγησης

Το λογισμικό NAPA Voyage Optimization λειτουργεί ως εξής:

- ένα τμήμα(module) της πλατφόρμας NAPA Fleet Intelligence είναι διαθέσιμο τόσο στη πρόγραμμα περιήγησης όσο και στην εφαρμογή υπολογιστή
- χρήση εργαλείων τόσο στο σκάφος όσο και στη στεριά για βέλτιστη επικοινωνία
- φιλικό περιβάλλον χρήσης με πλήθος λειτουργιών για χρήση σε ημερήσια βάση
- πλοήγηση βάσει καιρικών συνθηκών για πολλαπλά σενάρια χρήσης και σύγκριση αποτελεσμάτων βάσει ETA (αναμενόμενος χρόνος άφιξης), κόστος καυσίμων, περιβαλλοντική απόδοση και ασφάλεια
- μοντέλο υψηλής ακρίβειας για όλα τα εμπορικά πλοία το οποίο ανανεώνεται δυναμικά με δεδομένα που συλλέγονται από τα σκάφη αντικατοπτρίζοντας την τρέχουσα απόδοση
- επίσης διατίθεται και σε μορφή API που έχουν σκοπό την ενσωμάτωση του από τρίτους

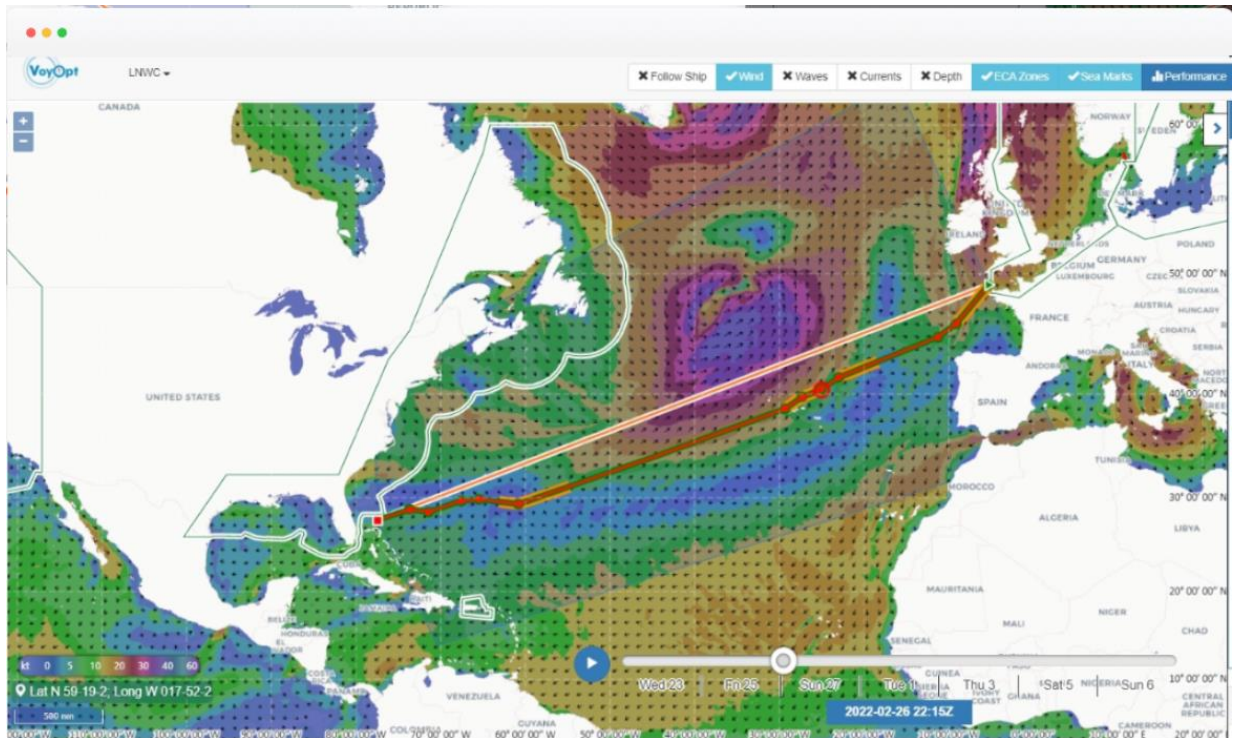


Εικόνα 4-5 Διάγραμμα λειτουργικότητας NAPA Voyage Optimization

Ανάμεσα στα πλεονεκτήματα χρήσης του διακρίνουμε την ασφάλεια, την οπτικοποίηση σημαντικών δεδομένων για την πλοήγηση του πλοίου, εξοικονόμηση πόρων και έλεγχος του αναμενόμενου χρόνου άφιξης.

## 4.2 Offshore Navigation

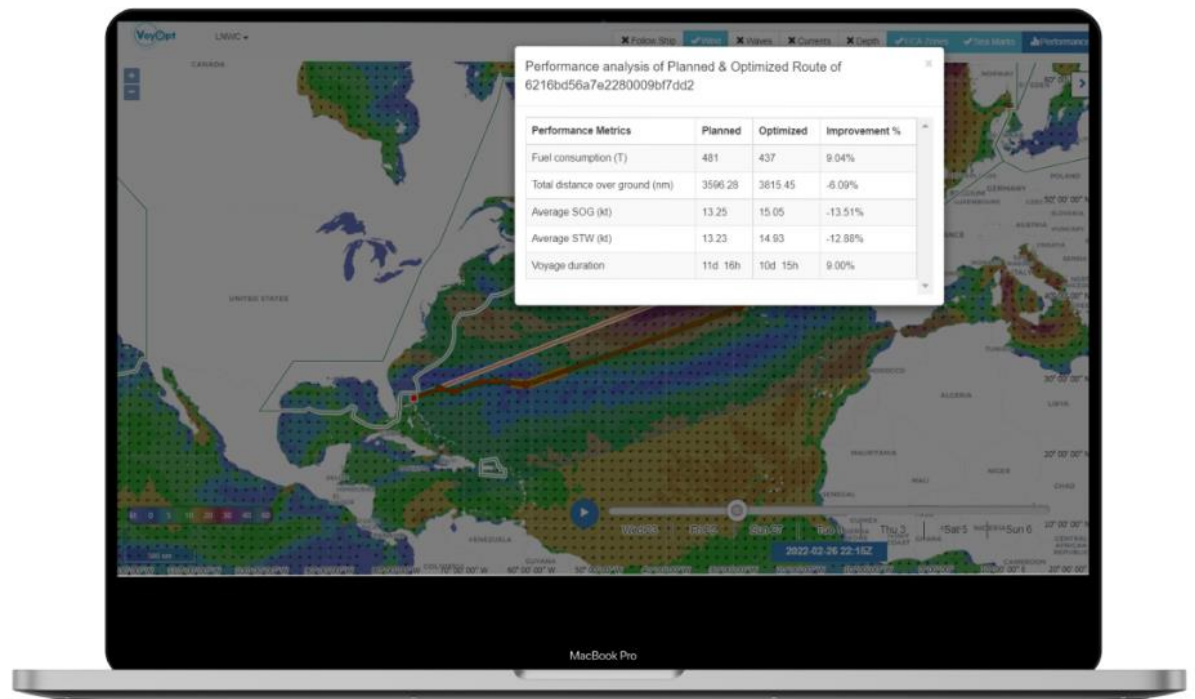
Η εταιρία Offshore Navigation[63] ιδρύθηκε το 2014 και δραστηριοποιείται στην ανάπτυξη λογισμικών πλοήγησης, στην ασφάλεια των θαλάσσιων ταξιδιών, στην προστασία των φορτίων που διακινούνται, στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων και εν γένει στην βελτιστοποίηση των θαλάσσιων ταξιδιών.



Εικόνα 4-6 Πλατφόρμα εφαρμογής της Offshore Navigation

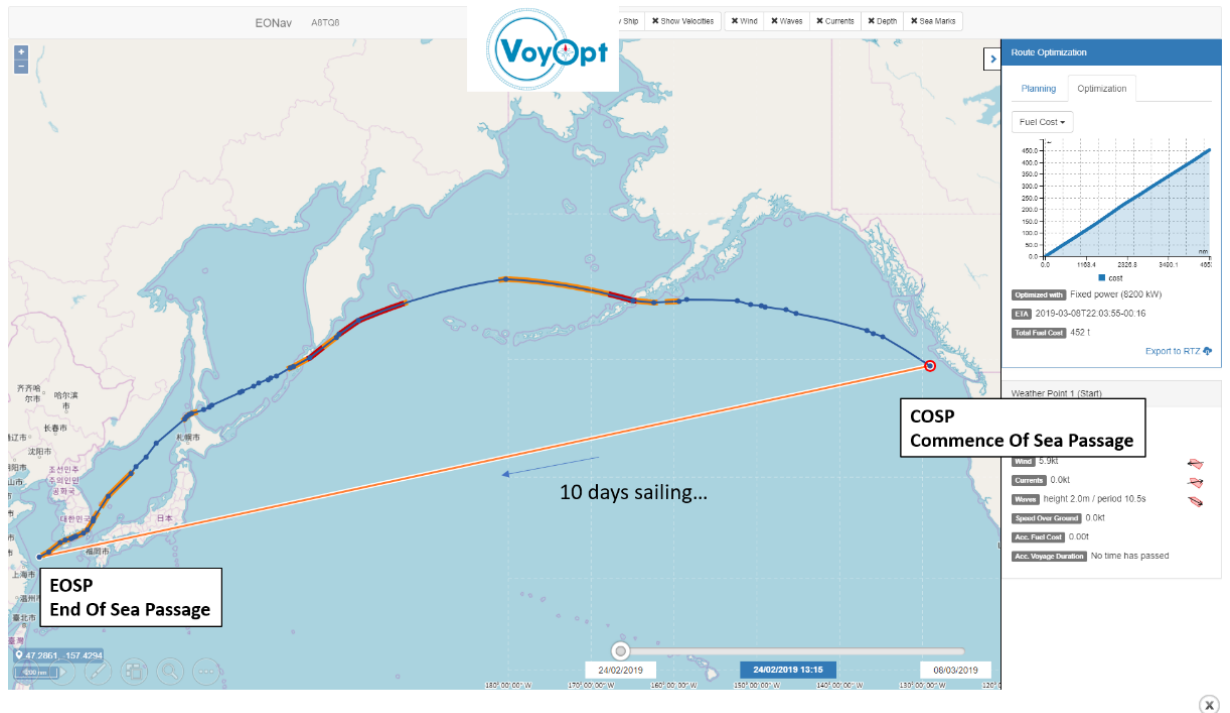
<https://www.offshorenavigation.com/wp-content/uploads/2022/03/Screenshot-2022-03-16-at-1.08.15-PM.png>





Εικόνα 4-7 Ανάλυση εφαρμογής για βελτιστοποίηση ταξιδιού

<https://www.offshorenavigation.com/wp-content/uploads/2022/03/mockuper-1-grey.png>



Εικόνα 4-8 Μελέτη περίπτωσης για δρομολόγηση πλοίου

[https://marine.copernicus.eu/sites/default/files/media/image/use\\_case/voyopt\\_illustration.png?itok=8DqN8](https://marine.copernicus.eu/sites/default/files/media/image/use_case/voyopt_illustration.png?itok=8DqN8)

[XFq](#)

#### 4.2.1 VoyOpt

Το VoyOpt® (Voyage Optimization) αποτελεί ένα καινοτόμο σύστημα σχεδιασμού πλοήγησης που αναπτύχθηκε από την Offshore Navigation Ltd. Πρόκειται για ένα σύστημα επίβλεψης και σχεδιασμού διαδρομής που λειτουργεί αδιάλειπτα, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες, το οποίο καθοδηγεί τα πλοία στην πιο αποτελεσματική διαδρομή από ένα λιμάνι στο επόμενο. Αυτές οι παρατηρήσεις είναι σε θέση να αντισταθμίσουν τα αδύναμα σημεία ενός συγκεκριμένου αισθητήρα με τα χαρακτηριστικά ενός άλλου. Η επιλογή της ομάδας των αισθητήρων γίνεται έτσι ώστε οι δυνατότητες των αισθητήρων να επικαλύπτονται και να συμπληρώνουν μερικώς η μία την άλλη. Το τελικό αποτέλεσμα είναι σημαντικά καλύτερο από το να βασιστεί κανείς αποκλειστικά στα μοντέλα πρόγνωσης καιρού για τον σχεδιασμό της διαδρομής του. Αυτό, από τη σειρά του, οδηγεί σε μια πιο ασφαλή και οικονομική εκτέλεση ναυτιλιακών και παράκτιων λειτουργιών.

Η τεχνολογία VoyOpt™ συνδυάζει κρίσιμες παραμέτρους ειδικά για τα πλοία – όπως την ταχύτητα πλεύσης, τη θέση GPS/AOIS, τις παραμέτρους κινητήρα, την ολίσθηση, την

κατάσταση φόρτωσης κ.λπ. – με μετεωρολογικές και ωκεανογραφικές παρατηρήσεις σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον αυτή έχει τη δυνατότητα να κάνει προβλέψεις για ένα χρονικό παράθυρο διαστήματος 16 ημερών, με τη βοήθεια ποικίλων διαστημικών, θαλάσσιων και παράκτιων συστημάτων καταχώρισης πληροφοριών. Οι ποικίλες αυτές πηγές πληροφοριών, παρέχουν δεδομένα για σημαντικές παραμέτρους όπως κύματα, ανέμους, ρεύματα, κακές καιρικές συνθήκες, συγκέντρωση θαλάσσιου πάγου, κλπ. Συνδυάζοντας πληροφορίες και παρατηρήσεις από πολλαπλές πηγές μέσω των καινοτόμων τεχνικών συγχώνευσης πληροφοριών, οι αδυναμίες μιας πηγής δεδομένων αντισταθμίζονται από τα χαρακτηριστικά μιας άλλης. Οι πηγές δεδομένων ενημερώνονται και αξιολογούνται συνεχώς προκειμένου να διασφαλιστεί ότι οι δυνατότητές του αλληλεπικαλύπτονται, εν μέρη, και αλληλοσυμπληρώνονται. Όλα αυτά καθιστούν το VoyOpt ένα σύστημα σχεδιασμού και βελτιστοποίησης διαδρομής 24/7 για όλες τις καιρικές συνθήκες.

Όλες αυτές οι παρατηρήσεις, οι παράμετροι και οι συνθήκες ενσωματώνονται για τη δημιουργία ενός βέλτιστου σχεδίου διαδρομής που βοηθά τον πλοίαρχο να επιλέξει τη βέλτιστη διαδρομή και καθώς και το βέλτιστο μοτίβο ταχύτητας προς το επόμενο λιμάνι– διαρκώς και σε πραγματικό χρόνο.

Το VoyOpt λειτουργεί με μια συνεχώς μεταβαλλόμενη ροή δεδομένων ρευμάτων, ανέμων, κυμάτων και καιρικών προτύπων, η οποία επανασχεδιάζεται για κάθε στιγμή κατά τη διάρκεια του ταξιδιού ενός πλοίου και της οποίας οι τιμές χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της κίνησης του πλοίου, της ταχύτητας, της ισχύος, της πίεσης του πλοίου, κ.λπ. σε κάθε κόμβο του δικτύου του με τη χρήση μοντέλων επιδόσεων ειδικά για το πλοίο.

Για τους χειριστές και το πλήρωμα η εν λόγω τεχνολογία VoyOpt δίνει τη δυνατότητα στους χειριστές πλοίων και στα άλλα μέλη του πληρώματος να επαναβαθμονομούν και να ιεραρχούν εκ νέου τα επερχόμενα ταξίδια ανά πάσα στιγμή. Αυτή η ευελιξία έχει ως αποτέλεσμα το σύστημα VoyOpt να παρουσιάζει ενημερωμένα σχέδια ταξιδιού με επανυπολογισμένους αναμενόμενους χρόνους άφιξης (Estimated Time of Arrival-ETA), μοτίβα ταχύτητας και άλλα.

Το σύστημα προσαρμόζεται δυναμικά στις αλλαγές του περιβάλλοντος καθ' όλη τη διάρκεια του ταξιδιού χρησιμοποιώντας αλγόριθμους μηχανικής μάθησης μαζί με δεδομένα πρόβλεψης καιρικών συνθηκών και θαλάσσιας κατάστασης σε πραγματικό χρόνο για να προβλέψει με υψηλή ακρίβεια τη ποσότητα κατανάλωσης καυσίμου, την ενεργειακή απόδοση,

την ταχύτητα του πλοίου και άλλες κρίσιμες πληροφορίες που σχετίζονται με την απόδοση του ταξιδιού γενικότερα

Συνοψίζοντας τα οφέλη από την χρήση και εφαρμογή της τεχνολογίας έχουμε:

- σημαντική αύξηση της αποτελεσματικότητας βελτιστοποιώντας αυτόματα τα σχέδια ταξιδιού με τις πιο πρόσφατες ενημερώσεις για να διασφαλιστεί η ασφαλής διέλευση, ενώ παράλληλα μειώνονται σημαντικά οι καθυστερήσεις στην εκτιμώμενη ώρα άφιξης. Οι χειριστές πλοίων και τα μέλη του πληρώματος μπορούν να υπολογίσουν την εκτιμώμενη ώρα άφιξης με ακρίβεια, λαμβάνοντας επίσης βασικούς παράγοντες όπως η απόδοση του σκάφους, οι καιρικές συνθήκες και προβλέψεις, καθώς και οι συνθήκες ανοιχτής θάλασσας.
- ένα ολοκληρωμένο βοήθημα πλοήγησης που βελτιώνει την καθορισμένη πορεία για να εξασφαλίσει τη μέγιστη μείωση των εκπομπών καυσίμων.
- ένα εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων με εποπτεία 360 μοιρών, δίνοντας τη δυνατότητα στους ναυτικούς να αλλάξουν πορεία και να επιλέξουν την πιο έξυπνη διαδρομή επιτυγχάνοντας τη μέγιστη εξοικονόμηση καυσίμου.
- μείωση του φόρτου εργασίας του πληρώματος βελτιώνοντας την ασφάλεια επί του πλοίου και αυξάνοντας την αυτοματοποίηση.
- μείωση των ανθρώπινων παραγόντων κινδύνου με τις αυτοματοποιημένες δυνατότητες πλοήγησης
- ελαχιστοποιεί τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο της παγκόσμιας δραστηριότητας της ναυτιλίας και των μεταφορών.
- εξοικονόμηση χρόνου και μείωση του διοικητικού φόρτου με ταυτόχρονη βελτιστοποίηση την αυτοματοποίησης και την ψηφιοποίηση των διαδικασιών.

Για τους υπεύθυνους διαχείρισης των πλοίων το VoyOpt παρέχει ένα ανταγωνιστικό πλεονέκτημα συγχρονίζοντας πολύτιμες πληροφορίες βελτιστοποίησης ταξιδιού και σχεδιασμού και βελτιστοποίησης διαδρομής καιρού σε πραγματικό χρόνο και διευκολύνοντας τη σαφή επικοινωνία με τον χειριστή και το πλήρωμα του πλοίου σε όλα τα μέρη του ταξιδιού. Τα βελτιστοποιημένα σχέδια δρομολογίων κοινοποιούνται σε πραγματικό χρόνο στα πλοία για πολλαπλά οφέλη, όπως η εξοικονόμηση καυσίμων και η μείωση της ρύπανσης. Οι υπεύθυνοι διαχείρισης της κίνησης των πλοίων είναι σε θέση να βλέπουν τη θέση των πλοίων και τις

πληροφορίες απόδοσης σε πραγματικό χρόνο σε μια ενιαία πλατφόρμα με οπτικό τρόπο, επιτρέποντας καλύτερη παρουσίαση και ευκολότερη ερμηνεία των πληροφοριών.

Ανάμεσα στα οφέλη συγκαταλέγονται τα ακόλουθα:

- ενίσχυση της απόδοσης του στόλου των πλοίων, των λειτουργιών του πλοίου με στόχο την υποστήριξη της κερδοφορίας.
- δυνατότητα υπολογισμού από λιμάνι σε λιμάνι και γενικότερα από προορισμό σε προορισμό, σε πραγματικό χρόνο ολόκληρου του σχεδίου ταξιδιού, καθώς και χρήσιμων παραμέτρων πλοήγησης όπως ταχύτητα, χρήση καυσίμων, κόστος καυσίμων, χαρτογράφηση διαδρομής, πρόβλεψη καιρού, ενημερωμένες συνθήκες θάλασσας. Επίσης επιτρέπει στους υπεύθυνους διαχείρισης των διαδρομών του ταξιδιού την γρήγορη ανταπόκριση σε τυχόν αλλαγές στις θαλάσσιες καιρικές αλλά και αλλαγές που άπτονται σε οικονομικούς λόγους και επηρεάζουν το ταξίδι.
- διαρκής συμμόρφωση με την πλοήγηση και το περιβάλλον.
- παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο ολόκληρου του στόλου των πλοίων με τη χρήση ενός ενοποιημένου πίνακα ελέγχου.
- ο άμεσος επανυπολογισμός του VoyOpt™ σημαίνει ότι είναι ευκολότερο από ποτέ να επιτευχθούν τα βέλτιστα αποτελέσματα ταξιδιού λόγω της ευελιξίας που παρέχει η λύση VoyOpt™.
- πλήρως προσαρμόσιμο για όλους τους τύπους πλοίων (μικρά και μεγάλα πλοία), όλες τις ναυτιλιακές δραστηριότητες (μικρά και μεγάλα ταξίδια), ανά πάσα στιγμή (σε πραγματικό χρόνο) και ικανοποιεί όλους τους πιθανούς στόχους της διαχείρισης του στόλου και των χειριστών πλοίων .

### **4.3 Copernicus Marine Service**

Η Copernicus Marine Service[64] είναι μια υπηρεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης που παρέχει δεδομένα και πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση και την εξέλιξη των ωκεανών και των θαλασσών του πλανήτη μας. Το πρόγραμμα έχει το επίσημο όνομα "Copernicus Marine Environment Monitoring Service" και είναι ένα από τα στοιχεία του ευρύτερου προγράμματος

Copernicus, το οποίο στοχεύει στην παροχή πληροφοριών για την περιβαλλοντική παρακολούθηση και την αειφόρο ανάπτυξη.



Εικόνα 4-9 Λογότυπο κεντρικής ιστοσελίδας του συστήματος Copernicus

[https://marine.copernicus.eu/register-copernicus-marine-service?mtm\\_campaign=Copernicus-Souscription&mtm\\_medium=cpc&mtm\\_source=google&mtm\\_content=text&mtm\\_cid=145762311002&mtm\\_kwd=copernicus%20marine%20service&gclid=Cj0KCQjw0bunBhD9ARIsAAZl0E2bITVdHZ78vslc3Z9rnnUP7wIVltVs7Km59CGtQH\\_-jVLqdlEUsuMaAlZ\\_EALw\\_wcB](https://marine.copernicus.eu/register-copernicus-marine-service?mtm_campaign=Copernicus-Souscription&mtm_medium=cpc&mtm_source=google&mtm_content=text&mtm_cid=145762311002&mtm_kwd=copernicus%20marine%20service&gclid=Cj0KCQjw0bunBhD9ARIsAAZl0E2bITVdHZ78vslc3Z9rnnUP7wIVltVs7Km59CGtQH_-jVLqdlEUsuMaAlZ_EALw_wcB)

Η Copernicus Marine Service συγκεντρώνει δεδομένα από δορυφόρους, αισθητήρες σε πλοία, ακτές και άλλες πηγές παρακολούθησης. Αυτά τα δεδομένα περιλαμβάνουν πληροφορίες για τη θερμοκρασία της θάλασσας, την υψομετρία της επιφάνειας της θάλασσας, τον ρυθμό ροής των ωκεανών, την περιεκτικότητα σε αλάτι, τη ρύπανση του νερού, τις κυματικές συνθήκες και πολλά άλλα. Επιπλέον αξιοποιούνται για την παρακολούθηση της κλιματικής αλλαγής, της παρακολούθησης των κυμάτων, των καιρικών συνθηκών στις θάλασσες, τη διαχείριση των αλιευτικών πόρων, την πλοήγηση, την πρόβλεψη πλημμυρών και πολλές άλλες εφαρμογές. Ο σκοπός της υπηρεσίας αυτής είναι να παρέχει αξιόπιστες, ενημερωμένες και ποιοτικές πληροφορίες σχετικά με τη θαλάσσια κατάσταση, προκειμένου να στηρίξει τις αποφάσεις σε θέματα που αφορούν το περιβάλλον, την οικονομία και την ασφάλεια στις θάλασσες. Η Copernicus Marine Service δραστηριοποιείται μέσω της συλλογής, επεξεργασίας και διάθεσης μεγάλου όγκου δεδομένων σχετικά με τους ωκεανούς και τις θάλασσες. Αυτά τα δεδομένα είναι διαθέσιμα δωρεάν για το κοινό, επιτρέποντας σε ερευνητές, κυβερνητικούς φορείς, επιχειρήσεις και κοινό να αξιοποιήσουν τις πληροφορίες για τη λήψη αποφάσεων, την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και την αντιμετώπιση προκλήσεων που σχετίζονται με τους ωκεανούς.

Η υπηρεσία παρέχει διάφορα εργαλεία και πόρους για την ανάλυση και την επεξεργασία των δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων διαδραστικών χαρτών, προγνώσεων και μοντέλων που παρέχουν ενημερωμένες πληροφορίες για τη θαλάσσια κατάσταση. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στην πρόβλεψη και τη διαχείριση κινδύνων όπως η πειρατεία, οι πλημμύρες, οι θαλάσσιες καταστροφές και η ασφάλεια της ναυσιπλοΐας. Η Copernicus Marine Service συμβάλλει επίσης

στην κατανόηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στους ωκεανούς και τις θάλασσες, και παρέχει πληροφορίες για τη δυναμική του ωκεανού, τη θαλάσσια βιοποικιλότητα, την υδρογραφία και πολλά άλλα σημαντικά θέματα. Συνολικά, η Copernicus Marine Service αποτελεί ένα κρίσιμο εργαλείο για την παρακολούθηση, την κατανόηση και τη διαχείριση των θαλάσσιων περιβαλλοντικών προκλήσεων που αντιμετωπίζει ο πλανήτης μας. Η Copernicus Marine Service παρέχει πληροφορίες και δεδομένα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δρομολόγηση πλοίων. Αν και η υπηρεσία δεν παρέχει άμεσες υπηρεσίες δρομολόγησης πλοίων, τα δεδομένα που παρέχει μπορούν να χρησιμοποιηθούν από εταιρείες, φορείς και επαγγελματίες της ναυτιλίας για την καλύτερη προσαρμογή των δρομολογήσεων των πλοίων τους στις θαλάσσιες συνθήκες και τις καιρικές προβλέψεις. Οι πληροφορίες που παρέχονται από την Copernicus Marine Service μπορούν να βοηθήσουν στην αναγνώριση βέλτιστων διαδρομών που λαμβάνουν υπόψη τις προγνώσεις για κυματισμούς, ρεύματα, ανέμους και άλλες θαλάσσιες συνθήκες. Αυτό μπορεί να συμβάλει στην εξοικονόμηση καυσίμων, την αποφυγή επικίνδυνων περιοχών και τη βελτιστοποίηση των διαδρομών πλοίων για αποδοτικότερα και ασφαλέστερα ταξίδια. Η χρήση των πληροφοριών της Copernicus Marine Service για τη δρομολόγηση πλοίων, μπορεί να γίνει με αξιοποίηση των διαθέσιμων εργαλείων, όπως διαδραστικοί χάρτες και τις προγνώσεις που παρέχονται μέσω της υπηρεσίας.

## **5 Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Εφαρμογή**

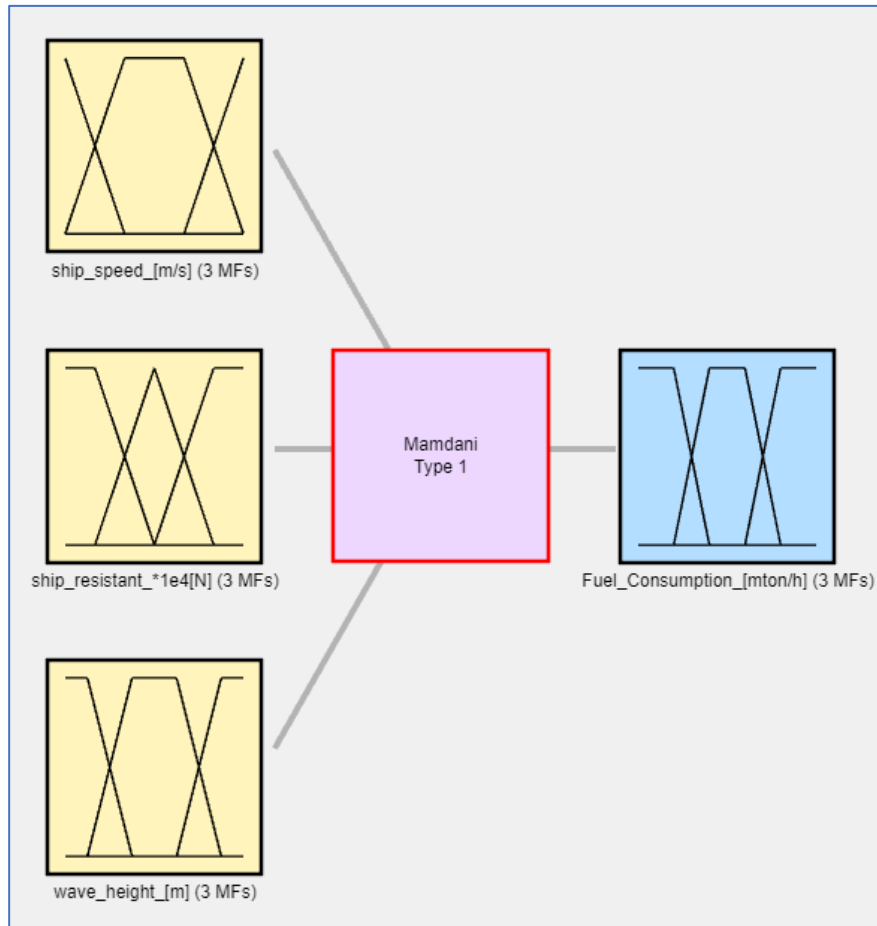
Στο πέμπτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασία περιγράφεται η εφαρμογή που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η ανάπτυξη έγινε στο περιβάλλον Matlab με χρήση του εργαλείου fuzzyLogicDesigner που είναι διαθέσιμο στην έκδοση 2022b που χρησιμοποιήθηκε και σκοπό της είναι ο υπολογισμός της κατανάλωσης καυσίμων πλοίου βάσει παραμέτρων καιρικών συνθηκών.

### **5.1 Περιγραφή συστήματος**

#### **5.1.1 Είσοδοι - Έξοδοι**

Η εφαρμογή του ασαφούς συστήματος συμπερασμάτων (Fuzzy Inference System) που αναπτύχθηκε διαθέτει τρεις εισόδους και μία έξοδο. Οι εισοδοι στο σύστημα είναι η ταχύτητα του πλοίου σε m/s, η αντίσταση που εμφανίζεται στο πλοίο σε  $\times 10^4$  N, το ύψος των κυμάτων σε m. Η έξοδος του συστήματος είναι η κατανάλωση καυσίμων σε mton/h. Στην εικόνα 5.1 παρουσιάζεται το μπλοκ διάγραμμα της εφαρμογής.



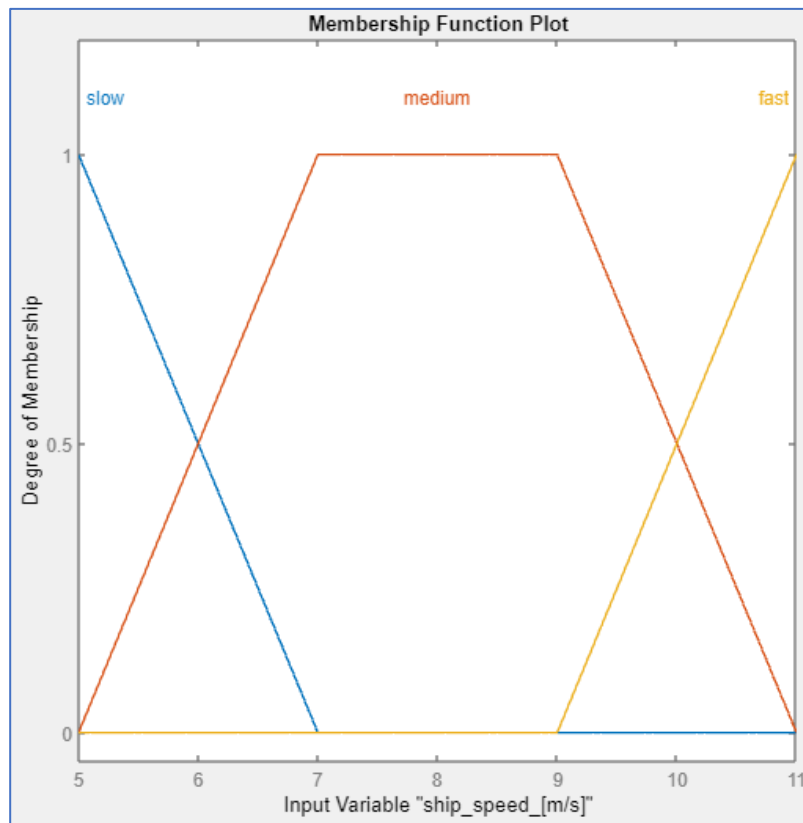


Εικόνα 5-1 Μοντέλο εφαρμογής, τριών εισόδων και μίας εξόδου

## 5.1.2 Συναρτήσεις συμμετοχής

### 5.1.2.1 Ταχύτητα πλοίου

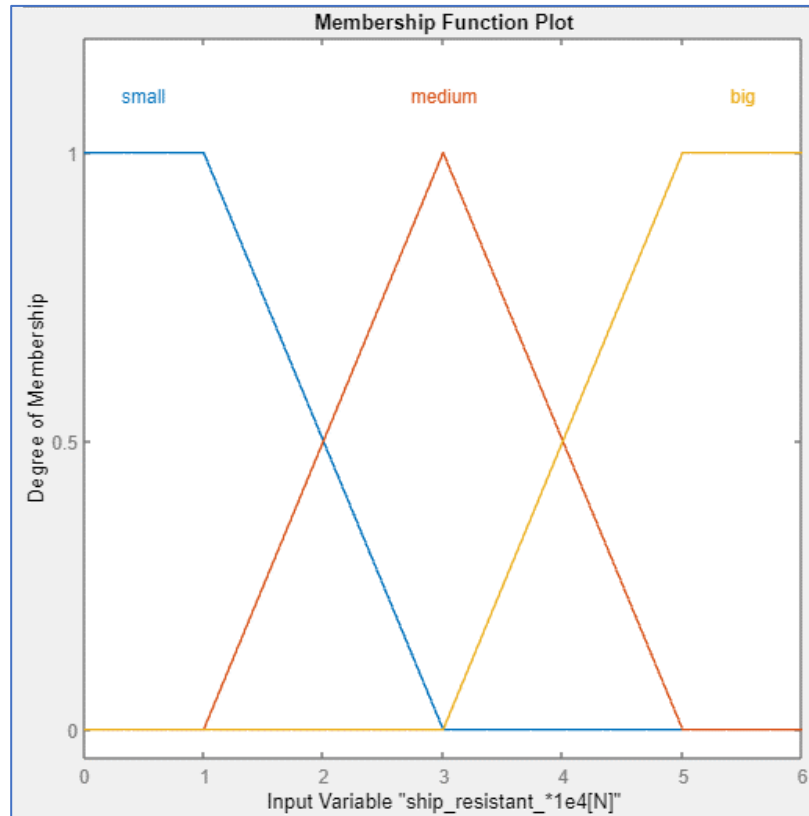
Η είσοδος που συσχετίζεται με την ταχύτητα πλοίου έχει θεωρηθεί ότι λαμβάνει τιμές στο σύνολο [5,11] m/s δηλαδή από 9,72 κόμβους έως 21,38 κόμβους, όπου και αποτελούν τυπικές τιμές εμπορικών-φορτηγών πλοίων σύμφωνα με [65]. Οι συναρτήσεις συμμετοχής που επιλέχθηκαν για την είσοδο αυτή είναι οι εξής: για την περιγραφή των χαμηλών ταχυτήτων (slow) τριγωνική με σημεία [5, 5, 7], για τις μεσαίες ταχύτητες (medium) τραπεζοειδής με σημεία [5, 7, 9, 11], για τις υψηλές ταχύτητες (fast) τριγωνική με σημεία [9, 11, 11]. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το γράφημα των συναρτήσεων συμμετοχής για αυτή την είσοδο.



Εικόνα 5-2 Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου ταχύτητα πλοίου

### 5.1.2.2 Αντίσταση πλοίου

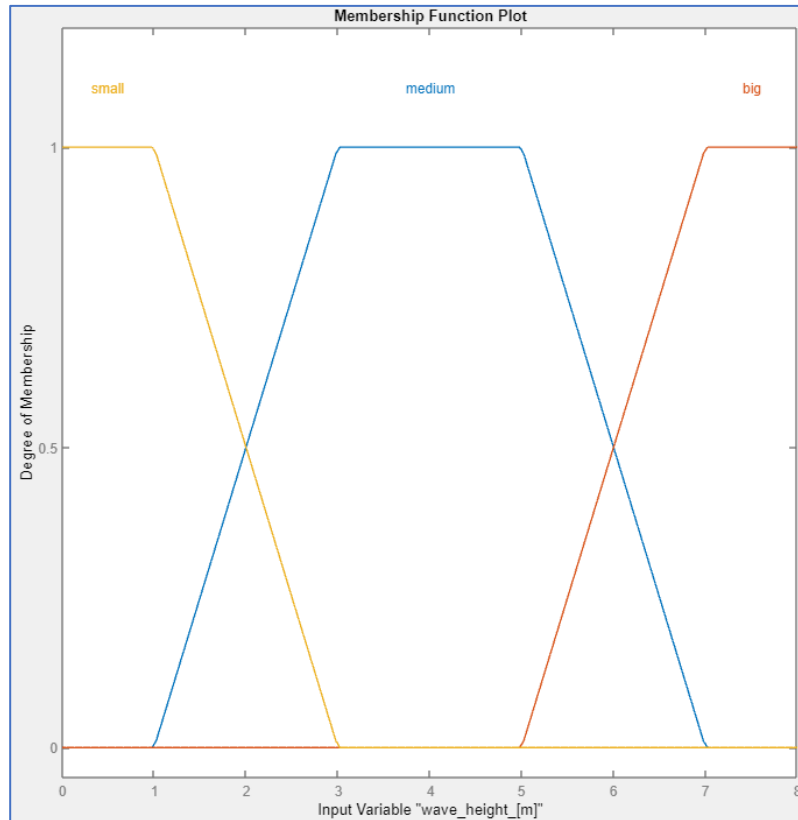
Η αντίσταση πλοίου έχει θεωρηθεί ότι λαμβάνει τιμές από 0 έως  $6 \times 10.000N$  όπως αναφέρεται για πλοία αυτή της κατηγορίας στο [66]. Η είσοδος αυτή εξαρτάται κατά μεγάλο βαθμό από το βύθισμα του πλοίου το οποίο μεταβάλλεται ανάλογα με το φορτίου που αυτό μεταφέρει αλλά και τον τύπο του. Οι συναρτήσεις συμμετοχής που επιλέχθηκαν είναι οι εξής: για την περιγραφή των τιμών χαμηλής αντίστασης (small) τραπεζοειδή με σημεία [0, 0, 1, 3], για τιμές μεσαίας αντίστασης (medium) τριγωνική με σημεία [1, 3, 5] ενώ για τις υψηλές τιμές αντίστασης (big) η συνάρτηση συμμετοχής είναι τραπεζοειδής με σημεία [3, 5, 6, 6]. Στην εικόνα 5-3 φαίνονται γραφικά οι συναρτήσεις συμμετοχής για την είσοδο της αντίστασης του πλοίου



Εικόνα 5-3 Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου αντίσταση πλοίου

### 5.1.2.3 Ύψος κυμάτων

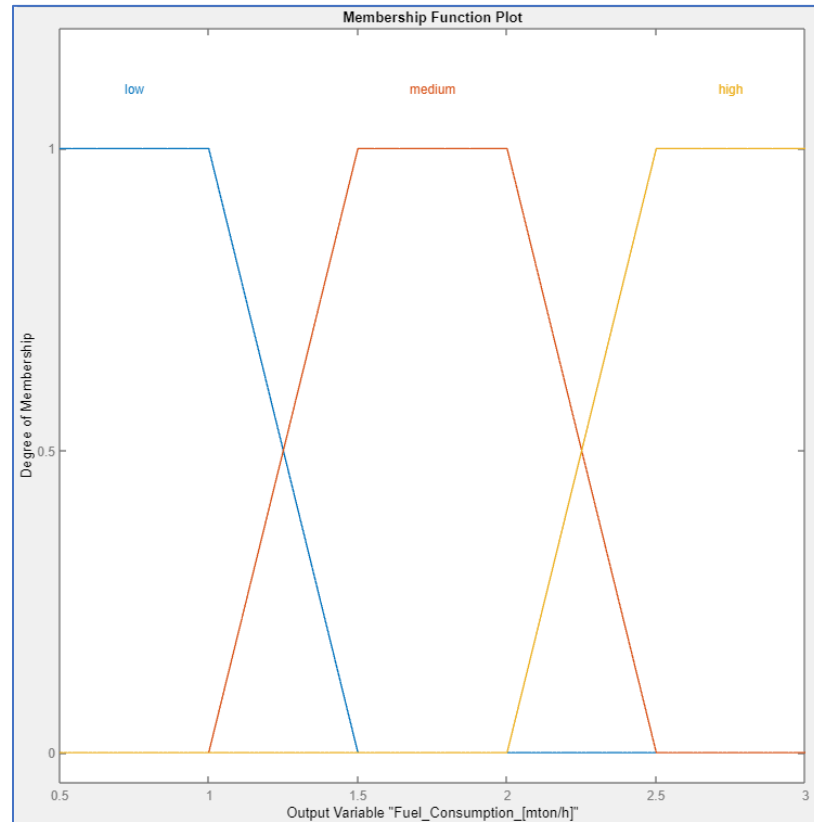
Το ύψος των κυμάτων λαμβάνει τιμές από 0m έως και 8m που αποτελούν τυπικές τιμές για ύψη κυμάτων στις θαλάσσιες περιοχές που κινούνται τα εμπορικά πλοία σύμφωνα με το [76]. Οι συναρτήσεις συμμετοχής για την είσοδο αυτή είναι τρεις small, medium, big. Η συνάρτηση συμμετοχής small είναι τραπεζοειδής στα σημεία [0, 0, 1, 3], η medium είναι τραπεζοειδής στα σημεία στα σημεία [5, 7, 8, 8] και τέλος η big επίσης τραπεζοειδής στα σημεία [1, 3, 5, 7]. Στην εικόνα 5-4 απεικονίζονται γραφικά οι συναρτήσεις συμμετοχής για την είσοδο που συσχετίζεται με το ύψος των κυμάτων.



Εικόνα 5-4 Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου ύψος κυμάτων

#### 5.1.2.4 Κατανάλωση καυσίμων

Η κατανάλωση καυσίμου λαμβάνει τιμές από 0,5 έως 3 mton/h που αποτελούν τυπικές τιμές για καταναλώσεις φορτηγών πλοίων σύμφωνα με το [76]. Οι συναρτήσεις συμμετοχής για την έξοδο αυτή είναι τρεις low, medium, high. Η συνάρτηση συμμετοχής low είναι τραπεζοειδής στα σημεία [0.5, 0.5, 1, 1.5], η medium είναι τραπεζοειδής στα σημεία στα σημεία [1, 1.5, 2, 2.5] και τέλος η high επίσης τραπεζοειδής στα σημεία [2, 2.5, 3, 3]. Στην εικόνα 5-5 απεικονίζονται γραφικά οι συναρτήσεις συμμετοχής για την κατανάλωση καυσίμου σε mton/h.



Εικόνα 5-5 Συναρτήσεις συμμετοχής έξοδος κατανάλωση καυσίμου

### 5.1.3 Σύνολο κανόνων

Το ασαφές σύστημα διαθέτει ένα σύνολο 27 κανόνων οι οποίοι παρουσιάζονται στους πίνακες 1α, 1β.

**Πίνακας 1α** Σύνολο κανόνων ασαφούς συστήματος

ΚΑΝΟΝΕΣ (από 1 μέχρι 14)	ΒΑΡΟΣ	ΟΝΟΜΑ
If ship_speed_[m/s] is slow and ship_resistant_*1e4[N] is small and wave_height_[m] is medium then Fuel_Consumption_[mton/h] is low	1	rule1
If ship_speed_[m/s] is medium and ship_resistant_*1e4[N] is small and wave_height_[m] is medium then Fuel_Consumption_[mton/h] is low	1	rule2
If ship_speed_[m/s] is fast and ship_resistant_*1e4[N] is small and wave_height_[m] is medium then Fuel_Consumption_[mton/h] is medium	1	rule3
If ship_speed_[m/s] is slow and ship_resistant_*1e4[N] is medium and wave_height_[m] is medium then Fuel_Consumption_[mton/h] is low	1	rule4
If ship_speed_[m/s] is medium and ship_resistant_*1e4[N] is medium and wave_height_[m] is medium then Fuel_Consumption_[mton/h] is medium	1	rule5
If ship_speed_[m/s] is fast and ship_resistant_*1e4[N] is medium and wave_height_[m] is medium then Fuel_Consumption_[mton/h] is high	1	rule6
If ship_speed_[m/s] is slow and ship_resistant_*1e4[N] is big and wave_height_[m] is medium then Fuel_Consumption_[mton/h] is medium	1	rule7
If ship_speed_[m/s] is medium and ship_resistant_*1e4[N] is big and wave_height_[m] is medium then Fuel_Consumption_[mton/h] is medium	1	rule8
If ship_speed_[m/s] is fast and ship_resistant_*1e4[N] is big and wave_height_[m] is medium then Fuel_Consumption_[mton/h] is high	1	rule9
If ship_speed_[m/s] is slow and ship_resistant_*1e4[N] is small and wave_height_[m] is big then Fuel_Consumption_[mton/h] is medium	1	rule10
If ship_speed_[m/s] is medium and ship_resistant_*1e4[N] is small and wave_height_[m] is big then Fuel_Consumption_[mton/h] is medium	1	rule11
If ship_speed_[m/s] is fast and ship_resistant_*1e4[N] is small and wave_height_[m] is big then Fuel_Consumption_[mton/h] is high	1	rule12
If ship_speed_[m/s] is slow and ship_resistant_*1e4[N] is medium and wave_height_[m] is big then Fuel_Consumption_[mton/h] is medium	1	rule13
If ship_speed_[m/s] is medium and ship_resistant_*1e4[N] is medium and wave_height_[m] is big then Fuel_Consumption_[mton/h] is high	1	rule14

**Πίνακας 2β** Σύνολο κανόνων ασαφούς συστήματος

KANONES (από 15 μέχρι 27)	ΒΑΡΟΣ	ΟΝΟΜΑ
If ship_speed_[m/s] is fast and ship_resistant_*1e4[N] is medium and wave_height_[m] is big then Fuel_Consumption_[mton/h] is high	1	rule15
If ship_speed_[m/s] is slow and ship_resistant_*1e4[N] is big and wave_height_[m] is big then Fuel_Consumption_[mton/h] is medium	1	rule16
If ship_speed_[m/s] is medium and ship_resistant_*1e4[N] is big and wave_height_[m] is big then Fuel_Consumption_[mton/h] is high	1	rule17
If ship_speed_[m/s] is fast and ship_resistant_*1e4[N] is big and wave_height_[m] is big then Fuel_Consumption_[mton/h] is high	1	rule18
If ship_speed_[m/s] is slow and ship_resistant_*1e4[N] is small and wave_height_[m] is small then Fuel_Consumption_[mton/h] is low	1	rule19
If ship_speed_[m/s] is medium and ship_resistant_*1e4[N] is small and wave_height_[m] is small then Fuel_Consumption_[mton/h] is low	1	rule20
If ship_speed_[m/s] is fast and ship_resistant_*1e4[N] is small and wave_height_[m] is small then Fuel_Consumption_[mton/h] is medium	1	rule21
If ship_speed_[m/s] is slow and ship_resistant_*1e4[N] is medium and wave_height_[m] is small then Fuel_Consumption_[mton/h] is low	1	rule22
If ship_speed_[m/s] is medium and ship_resistant_*1e4[N] is medium and wave_height_[m] is small then Fuel_Consumption_[mton/h] is medium	1	rule23
If ship_speed_[m/s] is fast and ship_resistant_*1e4[N] is medium and wave_height_[m] is small then Fuel_Consumption_[mton/h] is high	1	rule24
If ship_speed_[m/s] is slow and ship_resistant_*1e4[N] is big and wave_height_[m] is small then Fuel_Consumption_[mton/h] is medium	1	rule25
If ship_speed_[m/s] is medium and ship_resistant_*1e4[N] is big and wave_height_[m] is small then Fuel_Consumption_[mton/h] is medium	1	rule26
If ship_speed_[m/s] is fast and ship_resistant_*1e4[N] is big and wave_height_[m] is small then Fuel_Consumption_[mton/h] is high	1	rule27

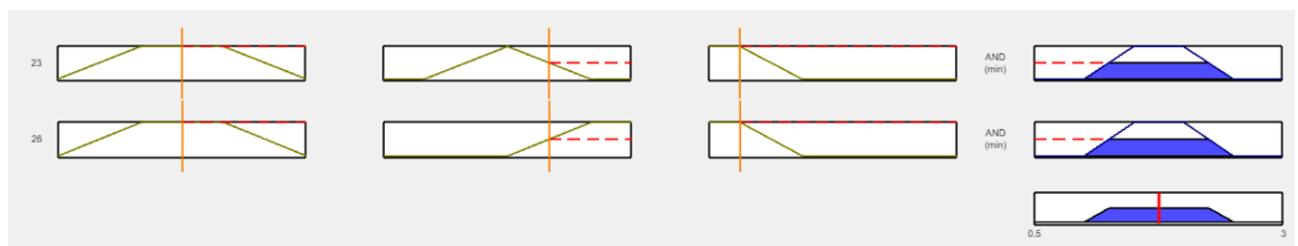
## 6 Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup> :Αποτελέσματα, Συμπεράσματα & Μελλοντικές Προοπτικές

Στο τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής έχουν συγκεντρωθεί τα αποτελέσματα από την μελέτη έξι περιπτώσεων της εφαρμογής που αναπτύχθηκε. Επιπλέον αναφέρονται συμπεράσματα που προέκυψαν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας καθώς και οι μελλοντικές προοπτικές που θα μπορούσε να έχει το τρέχον έργο.

### 6.1 Αποτελέσματα μελέτης περίπτωσης της εφαρμογής

Για τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας του ασαφούς συστήματος που αναπτύχθηκε έχουν εκτελεστεί έξι σενάρια λειτουργίας του με διαφορετικές κάθε φορά τιμές εισόδων ώστε να υπολογιστεί για κάθε περίπτωση η κατανάλωση καυσίμων(mton/h).

Στο πρώτο σενάριο έχουν θεωρηθεί τιμές εισόδου για ταχύτητα 8m/s για αντίσταση  $4 \times 10^4 \text{N}$  και για ύψος κυμάτων 1m. Όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα έχουν ενεργοποιηθεί οι κανόνες (23), (26) και η έξοδος που αφορά την κατανάλωση καυσίμου είναι 1,75mton/h.



Εικόνα 6-1 Σενάριο συστήματος με εισόδους τις τιμές 8, 4, 1 και έξοδο την τιμή 1,75

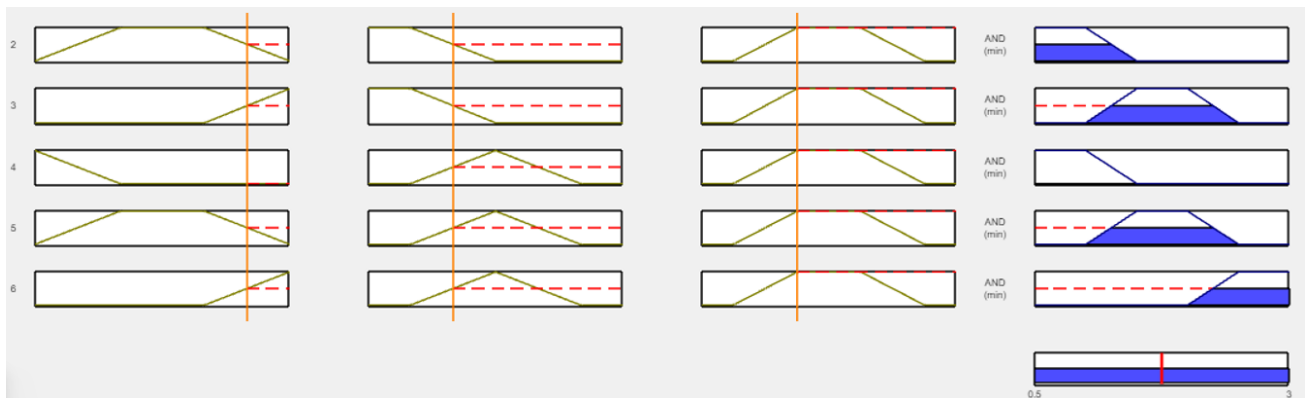
Στο δεύτερο σενάριο έχουν θεωρηθεί τιμές εισόδου για ταχύτητα 8m/s για αντίσταση  $5 \times 10000 \text{N}$  και για ύψος κυμάτων 3m. Όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα έχει ενεργοποιηθεί ο κανόνας (8) και η έξοδος που αφορά την κατανάλωση καυσίμου είναι 1,75mton/h.





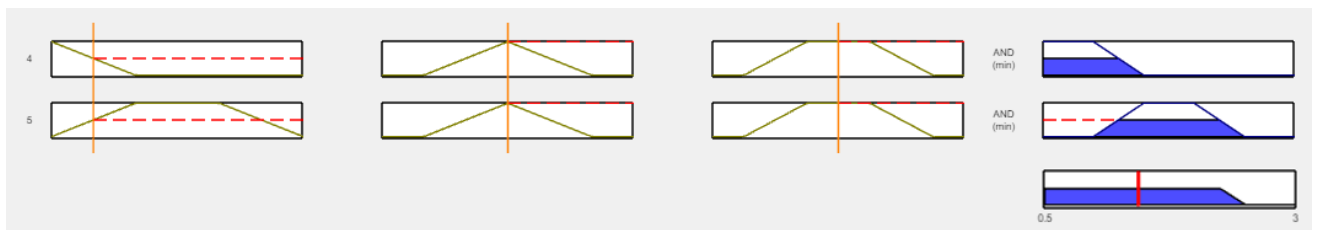
Εικόνα 6-2 Σενάριο συστήματος με εισόδους τις τιμές 7, 5, 3 και έξοδο την τιμή 1,75

Στο τρίτο σενάριο έχουν θεωρηθεί τιμές εισόδου για ταχύτητα 10m/s για αντίσταση  $2 \times 10000\text{N}$  και για ύψος κυμάτων 3m. Όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα έχουν ενεργοποιηθεί οι κανόνες (2), (3), (4), (5), (6) και η έξοδος που αφορά την κατανάλωση καυσίμου είναι 1,75mton/h.



Εικόνα 6-3 Σενάριο συστήματος με εισόδους τις τιμές 10, 2, 3 και έξοδο την τιμή 1,75

Στο τέταρτο σενάριο έχουν θεωρηθεί τιμές εισόδου για ταχύτητα 6m/s για αντίσταση  $3 \times 10000\text{N}$  και για ύψος κυμάτων 4m. Όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα έχουν ενεργοποιηθεί οι κανόνες (4), (5) και η έξοδος που αφορά την κατανάλωση καυσίμου είναι 1,43mton/h.



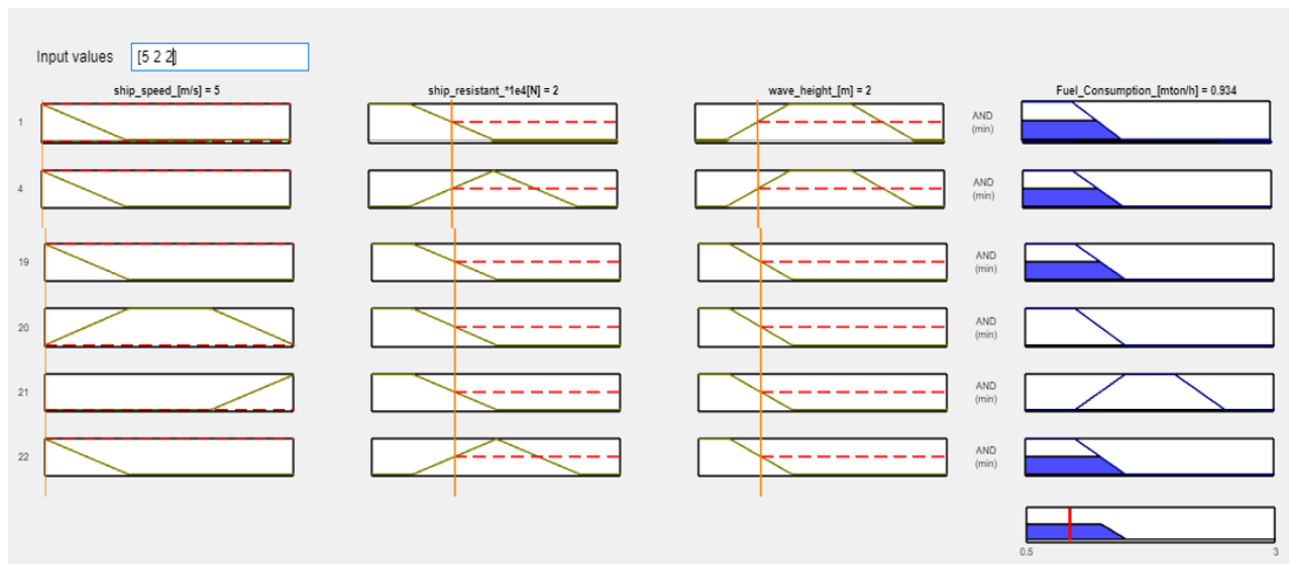
Εικόνα 6-4 Σενάριο συστήματος με εισόδους τις τιμές 6, 3, 4 και έξοδο την τιμή 1,43

Στο πέμπτο σενάριο έχουν θεωρηθεί τιμές εισόδου για ταχύτητα 10m/s για αντίσταση  $5 \times 10000\text{N}$  και για ύψος κυμάτων 7m. Όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα έχουν ενεργοποιηθεί οι κανόνες (4), (5) και η έξοδος που αφορά την κατανάλωση καυσίμου είναι 2,57mton/h.



Εικόνα 6-5 Σενάριο συστήματος με εισόδους τις τιμές 10, 5, 7 και έξοδο την τιμή 2.57

Στο έκτο σενάριο έχουν θεωρηθεί τιμές εισόδου για ταχύτητα 5m/s για αντίσταση  $2 \times 10000\text{N}$  και για ύψος κυμάτων 2m. Όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα έχουν ενεργοποιηθεί οι κανόνες (1), (4), (19), (20), (21), (22) και η έξοδος που αφορά την κατανάλωση καυσίμου είναι 0,934mton/h.



Εικόνα 6-6 Σενάριο συστήματος με εισόδους τις τιμές 5, 2, 2 και έξοδο την τιμή 0,934

### 6.1.1 Συγκεντρωτικά στοιχεία σεναρίων μελέτης κατανάλωσης καυσίμων

Στον πίνακα που ακολουθεί έχουν συγκεντρωθεί συνοπτικά τα αποτελέσματα από τα έξι σεσάρια μελέτης περίπτωσης στα οποία περιλαμβάνονται οι τιμές των τριών εισόδων(ταχύτητα, αντίσταση, ύψος κυμάτων) καθώς και η τιμή της εξόδου(κατανάλωση καυσίμων) κάθε μία περίπτωση.

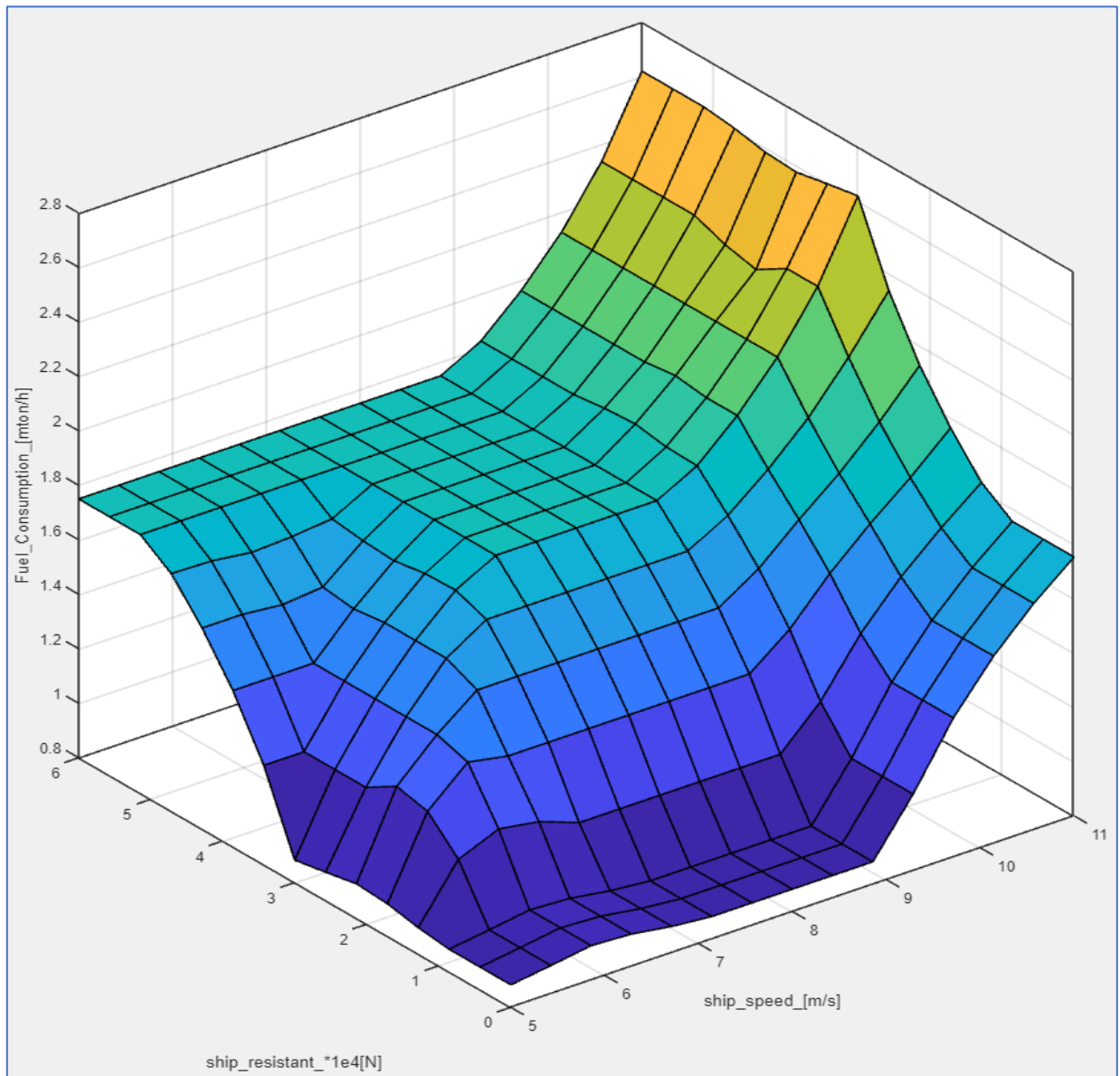
Πίνακας 3 Συγκεντρωτικά στοιχεία εισόδων-εξόδου για τα 6 σεσάρια δοκιμής της εφαρμογής

α/α Σεναρίου	ταχύτητα [m/s]	αντίσταση [ $\times 10^4 \text{N}$ ]	ύψος κυμάτων [m]	κατανάλωση [mton/h]
1	8	4	1	1,75
2	8	5	3	1,75
3	10	2	3	1,75
4	4	3	4	1,43
5	10	5	7	2,57
6	5	2	2	0,934

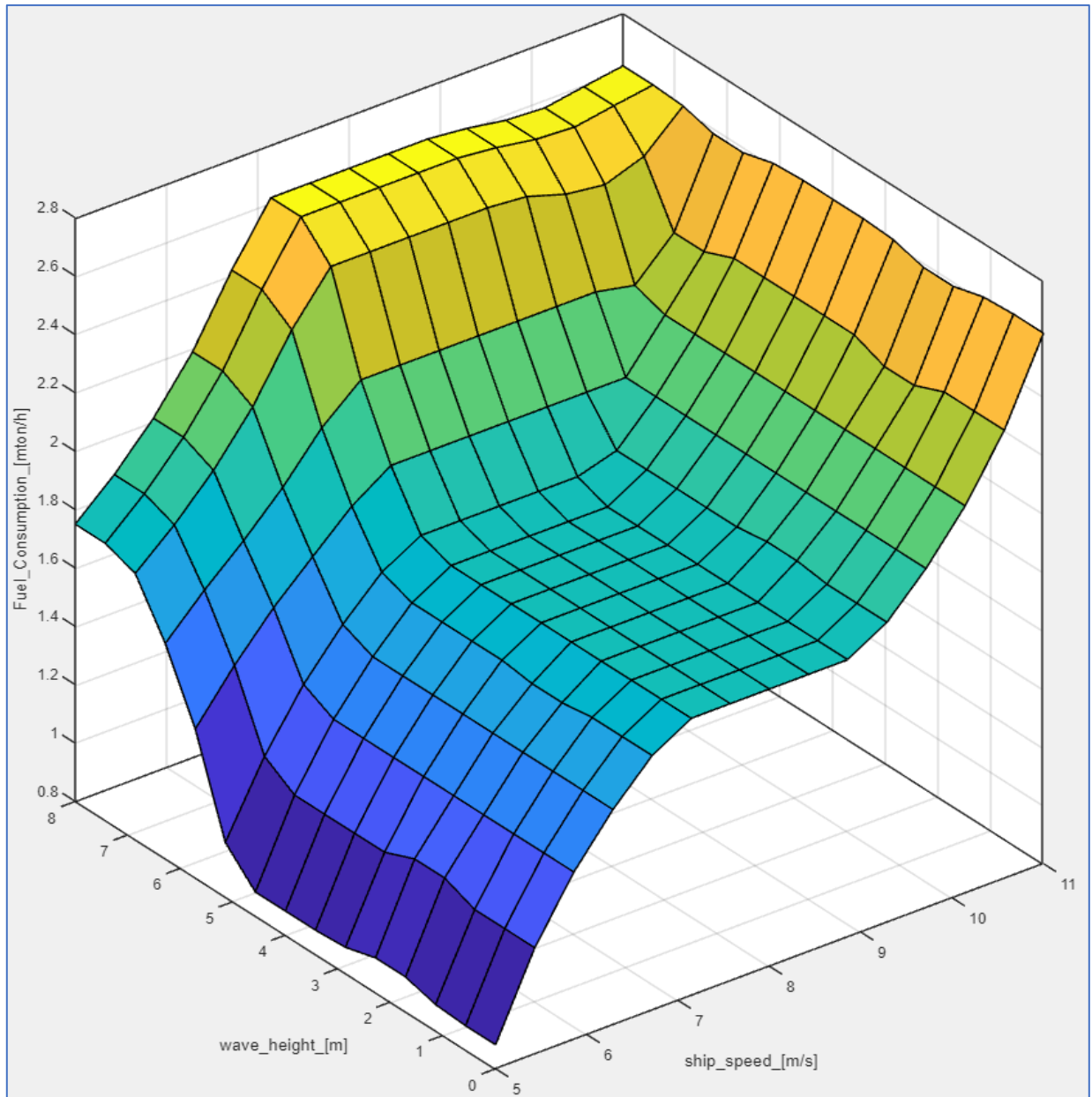
Από τον προηγούμενο πίνακα διαπιστώνεται ότι σημαντικό ρόλο στην μείωση της κατανάλωσης καυσίμων η οποία προκύπτει στο τελευταίο σεσάριο διαδραματίζει η παράμετρος που αφορά στην αντίσταση του πλοίου. Επίσης από το πρώτο και δεύτερο σεσάριο παρατηρείται ότι για μία σχετικά υψηλή ταχύτητα όπως είναι τα 8m/s η κατανάλωση διατηρείται σε σταθερά επίπεδα ακόμα και με μία αύξηση της αντίστασης του πλοίου της τάξεως του 20% και του ύψους των κυμάτων 66%. Στην ίδια κατανάλωση καταλήγει το προτεινόμενο μοντέλο με μία αύξηση στην ταχύτητα κατά 25% όταν παρατηρηθεί μείωση της αντίστασης από 5 σε 2 μονάδες δηλαδή -60% με ταυτόχρονη διατήρηση της τιμής στο ύψος κύματος.

Για την πληρέστερη επίδραση των τριών εισόδων στην κατανάλωση(έξοδος μοντέλου) χρησιμοποιήσαμε το εργαλείο control surface του fuzzyLogicDesigner στο οποίο απεικονίζεται γραφικά σε surface plot η επίδραση δύο εισόδων κάθε φορά (επίπεδο xy) στην έξοδο (συνιστώσα z). Έτσι στην εικόνα 6-7 απεικονίζεται η επιφάνεια εξάρτησης της κατανάλωσης συναρτήσει των εισόδων: αντίσταση πλοίου-ταχύτητας πλοίου, από την εν λόγω επιφάνεια παρατηρείται ότι για τιμές αντίστασης και ταχύτητας πάνω από 3 και 9 μονάδες αντίστοιχα η κατανάλωση καυσίμου από το πλοίο αυξάνεται σημαντικά λόγω αυτών των δύο εισόδων. Στην επόμενη επιφάνεια (εικ.6-8) η κατανάλωση απεικονίζεται συναρτήσει των εισόδων: ύψος κυμάτων και

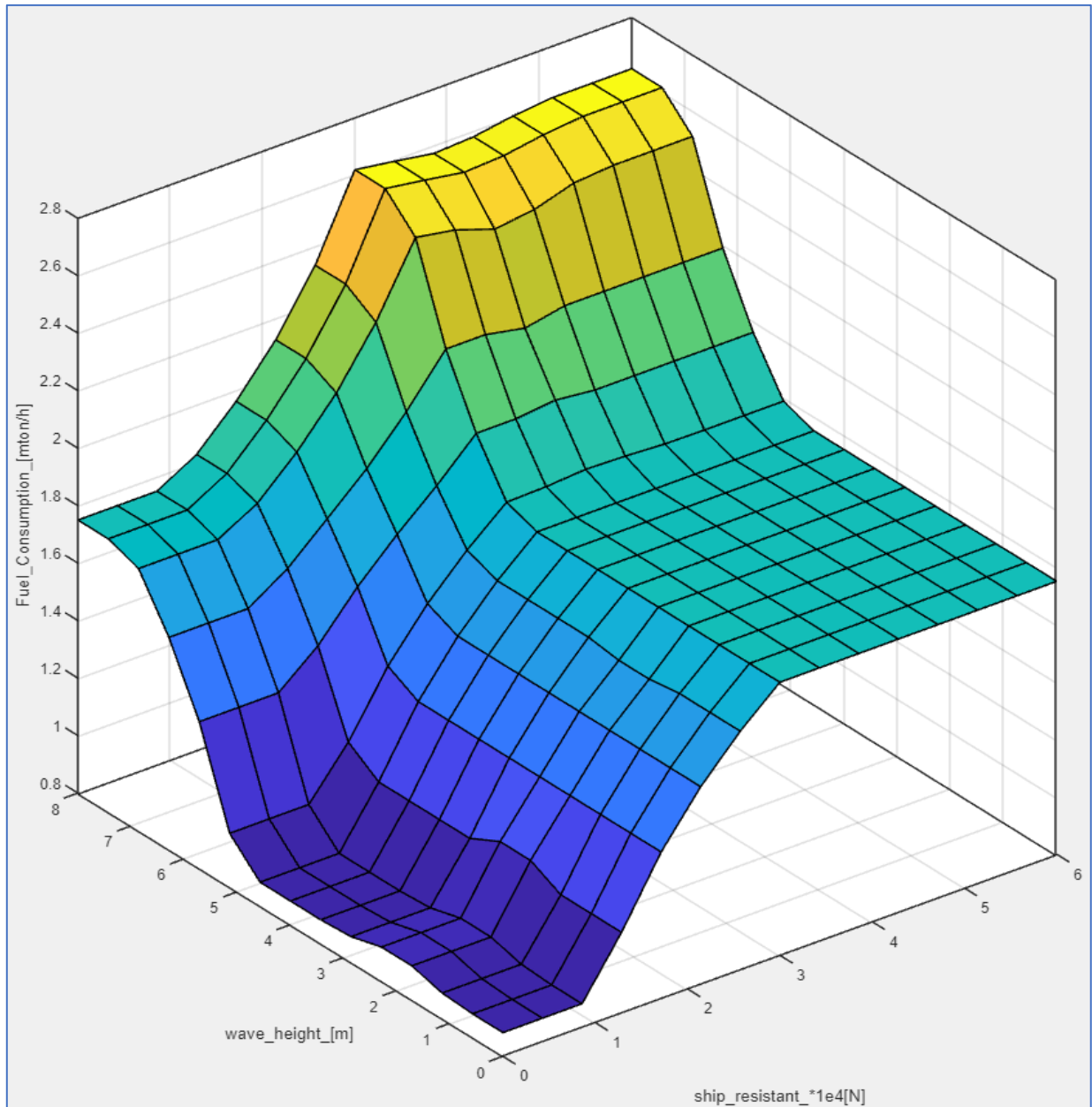
ταχύτητας όπου παρατηρείται απότομη αύξηση της κατανάλωσης για τιμές ύψους κύματος πάνω από 5 μονάδες και ταχύτητα πάνω από 7 μονάδες αυξάνεται σημαντικά η κατανάλωση. Τέλος στην τρίτη επιφάνεια (εικ. 6-9) συσχετίζεται η κατανάλωση με το ύψος κύματος και την αντίσταση, με την κατανάλωση να αυξάνεται για τιμές εισόδων 7 και 3 μονάδων αντίστοιχα.



**Εικόνα 6-7** Επιφάνεια ελέγχου κατανάλωσης καυσίμου(άξονας z) συναρτήσει αντίστασης πλοίου (άξονας x) και ταχύτητας πλοίου (άξονας y)



**Εικόνα 6-8** Επιφάνεια ελέγχου κατανάλωσης καυσίμου(άξονας z) συναρτήσει ύψους κυμάτων (άξονας x) και ταχύτητας πλοίου (άξονας y)



Εικόνα 6-9 Επιφάνεια ελέγχου κατανάλωσης καυσίμου(άξονας z) συναρτήσει ύψους κυμάτων πλοίου (άξονας x) και αντίστασης πλοίου (άξονας y)

## 6.2 Συμπεράσματα και μελλοντικές προοπτικές

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε η δυνατότητα ανάπτυξης ενός μοντέλου βελτιστοποίησης στον τομέα της θαλάσσιας πλοήγησης. Το προτεινόμενο μοντέλο προβλέπει την κατανάλωση καυσίμου λαμβάνοντας υπ' όψη το ύψος των κυμάτων, την αντίσταση του πλοίου η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με τον τύπο του πλοίου αλλά και με την ποσότητα του φορτίου που αυτό μεταφέρει και τέλος την ταχύτητα του πλοίου. Η εφαρμογή

αναπτύχθηκε στο περιβάλλον Matlab με χρήση του εργαλείου Fuzzy Logic Designer που είναι ενσωματωμένο σε αυτό.

Η χρήση μοντέλων ασαφούς λογικής για την βελτιστοποίηση των θαλάσσιων διαδρομών αποτελεί μία καινοτομία στο χώρο της ναυτιλίας. Τέτοιου είδους μοντέλα είναι ικανά να προβλέψουν εκείνη τη διαδρομή η οποία συνδυάζει τα εξής χαρακτηριστικά: εξοικονόμηση καυσίμων, μικρότερο ενεργειακό αποτύπωμα στον πλανήτη αλλά και θαλάσσιες συνθήκες η οποίες είναι πιο άνετες για το πλήρωμα του πλοίου κατά τη διάρκεια του ταξιδιού.

Η εφαρμογή που αναπτύχθηκε έχει τη δυνατότητα μελλοντικά να επεκταθεί σε αρκετά της σημεία τα οποία ήταν πέραν του πλαισίου μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στο προτεινόμενο μοντέλο μπορούν να προστεθούν και επιπλέον είσοδοι όπως η ταχύτητα του ανέμου η οποία μετά από μελέτη της διαθέσιμης βιβλιογραφίας παίζει εξίσου σημαντικό ρόλο στην κατανάλωση καυσίμων, παράλληλα θα μπορούσαν να παρέχονται δεδομένα πραγματικού χρόνου ώστε να προσαρμόζει δυναμικά τη διαδρομή. Ανάμεσα σε αυτά τα δεδομένα μπορούν να είναι οι θαλάσσιες συνθήκες αλλά και στοιχεία για τη διαφοροποίηση του κόστους καυσίμων στα σημεία ανεφοδιασμού τα οποία βρίσκονται στους ενδιάμεσους προορισμούς του ταξιδιού.

## 7 Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

- [1] S. Leduc, F. Starfelt, E. Dotzauer, G. Kindermann, I. McCallum, M. Obersteiner, J. Lundgren, Optimal location of lignocellulosic ethanol refineries with polygeneration in Sweden, *Energy*, Volume 35, Issue 6, 2010, Pages 2709-2716, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.07.018>.
- [2] Alexander Walther, Hamed Nili, Naveed Ejaz, Arjen Alink, Nikolaus Kriegeskorte, Jörn Diedrichsen, Reliability of dissimilarity measures for multi-voxel pattern analysis, *NeuroImage*, Volume 137, 2016, Pages 188-200, ISSN 1053-8119, <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.12.012>.  
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1053811915011258>)
- [3] .D. Hamilton, The genetical evolution of social behaviour. II, *Journal of Theoretical Biology*, Volume 7, Issue 1, 1964, Pages 17-52, ISSN 0022-5193, [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(64\)90039-6](https://doi.org/10.1016/0022-5193(64)90039-6). (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022519364900396>)
- [4] Haltiner, G. J., et al. “Minimal-Time Ship Routing.” *Journal of Applied Meteorology* (1962-1982), vol. 1, no. 1, 1962, pp. 1–7. JSTOR, <http://www.jstor.org/stable/26169430>.
- [5][https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/4/2/1520-450\\_1965\\_004\\_0217\\_mtsr\\_2\\_0\\_co\\_2.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/4/2/1520-450_1965_004_0217_mtsr_2_0_co_2.xml).
- [6] Bleick, W.E. and Faulkner, F.D. (1965) Minimal-time ship routing, AMETSOC.
- [7] Hemi, Hanane & Jamel, Ghouili & Cheriti, A.. (2015). An Optimal Control Solved by Pontryagin's Minimum Principle Approach for a Fuel Cell/Supercapacitor Vehicle. *Proceedings - 2014 Electrical Power and Energy Conference, EPEC 2014*. 87-92. 10.1109/EPEC.2014.15.
- [8] On minimal-time ship routing | TU Delft Repositories. (n.d.). Home | TU Delft Repositories. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:8367bbd9-260c-47d2-8ad1-e6303b7a2209>



- [9] Jacobi's Condition For The Problem Of Lagrange In The Calculus Of Variations (1916)
- [10] On the Applications of Optimal Control Theory and Dynamic Programming in Ship Routing  
S. J. Bijlsma: 29 August 2014 <https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.2002.tb00256.x>
- [11] R.W. James, Application of wave forecast to marine navigation (US Navy Hydrographic Office, Washington, 1957).
- [12] Szlapczynska, Joanna & Smierzchalski, Roman. (2007). ADOPTED ISOCHRONE METHOD IMPROVING SHIP SAFETY IN WEATHER ROUTING WITH EVOLUTIONARY APPROACH. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering - IJRQSE. [13] Klompstra, M.B., Olsder, G.J. & van Brunschot, P.K.G.M. The isopone method in optimal control. Dynamics and Control 2, 281–301 (1992).  
<https://doi.org/10.1007/BF02169518>
- [14] SPAANS, J. A.; STOTER, P. H. New developments in ship weather routing. Navigation (Paris), 1995, 43.169: 95-106.
- [15] Dijkstra, E.W., 1959. A note on two problems in connexion with graphs. Numerische mathematik, 1(1), pp.269–271.
- [16] International Symposium on Safety, Security and Environmental Protection, National Technical University Athens, Athens (2007)
- [17] Panigrahi, Jitendra & Tripathy, Jagadish Kumar & P. A., Umesh. (2008). Optimum tracking of ship routes in 3g-WAM simulated rough weather using IRS-P4 (MSMR) analysed wind fields. Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 36. 149-158. 10.1007/s12524-008-0015-1.
- [18] Padhy, Meera & Rana, Suvashisa & Mishra, Manisha. (2011). Self esteem and subjective wellbeing: Correlates of academic achievement of students. Research Journal of Social Science & Management (2271-1571).

- [19] Shift from Hippocampal to Neocortical Centered Retrieval Network with Consolidation  
Atsuko Takashima, Ingrid L.C. Nieuwenhuis, Ole Jensen, Lucia M. Talamini, Mark Rijpkema  
and Guillén Fernández  
Journal of Neuroscience 12 August 2009, 29 (32) 10087-10093; DOI:  
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0799-09.2009>
- [20] A Prototype of Ship Routing Decision Support System for an Operational Oceanographic  
Service, <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-49ee2be9-8fa7-4429-845b-41f9d5bb15ae>
- [21] Development of a Method for Weather Routing of Ships Eskild, Hege, Master thesis  
<http://hdl.handle.net/11250/238856>
- [22] Sen, Kunal, and Deb Kusum Das. "Where have all the workers gone? Puzzle of declining  
labour intensity in organised Indian manufacturing." *Economic and Political Weekly* (2015):  
108-115.
- [23] Chu, Peter C., Scott E. Miller, and James A. Hansen. "Fuel-saving ship route using the  
Navy's ensemble meteorological and oceanic forecasts." *The Journal of Defense Modeling and  
Simulation* 12.1 (2015): 41-56.
- [24] Jones, Larry E., Rodolfo E. Manuelli, and Peter E. Rossi. "Optimal taxation in models of  
endogenous growth." *Journal of Political economy* 101.3 (1993): 485-517.
- [25] Swartz, Mark E. "The Shubert Organization: One Singular Sensation, Now and Forever."  
*The Palgrave Handbook of Musical Theatre Producers* (2017): 291-301.
- [26] Assarzaghan, Narges, Chahar bagh khajou Street, and William Allan Kritsonis. "Dividing  
and composing the squares." *Lamar University Electronic Journal of Student Research*, Fall  
(2008): 13-20.

- [27] Simonsen, Martin Hjorth, et al. "State-of-the-art within ship weather routing." International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Vol. 56499. American Society of Mechanical Engineers, 2015.
- [28] Forrest, Stephanie. "Genetic algorithms." ACM computing surveys (CSUR) 28.1 (1996): 77-80.
- [29] Balachandran, M., and J. S. Gero. "A comparison of three methods for generating the Pareto optimal set." Engineering Optimization 7.4 (1984): 319-336.
- [30] Perera, Lokukaluge P., and C. Guedes Soares. "Weather routing and safe ship handling in the future of shipping." Ocean Engineering 130 (2017): 684-695.
- [31] Bellman, Richard, and Robert Kalaba. "Dynamic programming and statistical communication theory." Proceedings of the National Academy of Sciences 43.8 (1957): 749-751.
- [32] Chen, Henry. A dynamic program for minimum cost ship routing under uncertainty. Diss. Massachusetts Institute of Technology, 1978.
- [33] Klinger, T., et al. "Route to drift wave chaos and turbulence in a bounded low- $\beta$  plasma experiment." Physical review letters 79.20 (1997): 3913.
- [34] Aligne, F., M. Papageorgiou, and E. Walter. "Incorporating Power Variations into Weather Routing and Why It May Lead to Better Results." IFAC Proceedings Volumes 31.30 (1998): 269-274.
- [35] Shao, Wei, Peilin Zhou, and Sew Kait Thong. "Development of a novel forward dynamic programming method for weather routing." Journal of marine science and technology 17 (2012): 239-251.
- [36] Motte, R., R. S. Burns, and S. Calvert. "An overview of current methods used in weather routing." The Journal of Navigation 41.1 (1988): 101-114.

- [37] Perera, Lokukaluge P., and C. Guedes Soares. "Weather routing and safe ship handling in the future of shipping." *Ocean Engineering* 130 (2017): 684-695.
- [38] Vettor, Roberto, and C. Guedes Soares. "Development of a ship weather routing system." *Ocean Engineering* 123 (2016): 1-14.
- [39] Cox, Andrew T., and Vincent J. Cardone. "20 years of operational forecasting at Oceanweather." *Proc. 7th Int. Workshop Wave Hindcasting Forecasting*. 2002.
- [40] Mukhopadhyay, P., et al. "Performance of a very high-resolution global forecast system model (GFS T1534) at 12.5 km over the Indian region during the 2016–2017 monsoon seasons." *Journal of Earth System Science* 128 (2019): 1-18.
- [41] Khobragade, Shweta, et al. "Integrated Farming System (IFS): A Review." *International Journal of Economic Plants* 8.3 (2021): 181-187.
- [42] Gwynne, Michael D. "The global environment monitoring system (GEMS) of UNEP." *Environmental Conservation* 9.1 (1982): 35-41.
- [43] McGrath, Robert E. "Transition from HDF5 for HDF4 Users: status and goals." (2002).
- [44] Prpić-Oršić, J., et al. "Influence of ship routes on fuel consumption and CO2 emission." *Maritime Technology and Engineering*. Taylor & Francis Group, London (2015).
- [45] Vettor, Roberto, and C. Guedes Soares. "Development of a ship weather routing system." *Ocean Engineering* 123 (2016): 1-14.
- [46] Zadeh, Lotfi Asker, George J. Klir, and Bo Yuan. *Fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy systems: selected papers*. Vol. 6. World scientific, 1996.
- [47] T. TAKAGI and M. SUGENO, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control," *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, vol. 15,

no. 1, pp. 116–132, 1985

[48] Perera, Lokukaluge P., and C. Guedes Soares. "Weather routing and safe ship handling in the future of shipping." *Ocean Engineering* 130 (2017): 684-695.

[49] MAN Diesel & Turbo., 2012. *Basic Principles of Ship Propulsion*. Copenhagen, Denmark  
MARIN, 2006, "Sea trial analysis JIP, recommended practice for speed trials," report No( : 18200-2-TM.)

[50] Matulja, D., Sportelli, M., Gudes Soares, C., Prpic-Orsic, J., 2011. Estimation of added resistance of a ship in regular waves. *BrodoGrandnja* 62 (3), 259–264

[51] Perera, L.P., Mo, B., Kristjansson, L.A., Jonvik, P.C., Svoldal, J.O., 2015a. Evaluations on ship performance under varying operational conditions. In: *Proceedings of the 34<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Newfoundland, Canada, (OMAE2015-41793).

[52] TTC, 2005a. *Recommended Procedures and Guidelines, "Full scale measurements speed and power trials analysis of speed/power trial data,"* specialist committee on powering performance of 24th ITTC.

[53] ISO15016, 2002. *Ships and Marine Technology Guidelines for the Assessment of Speed and Ower Performance by Analysis of Speed Trial Data*. International Standard.

[54] Flikkema, M., 2009. *Service performance analysis joint industry project*. SWZ/Maritime

[55] Salvesen, N., Tuck, E.O., Faltinsen, O., 1970. Ship motions and sea loads. *Trans. SNAME* 78 (8), 250–287.

[56] Kohlmoos, A., Dudson, E., Rambech, H.J., 2001. Prediction of global wave induced response for the adx express high-speed catamaran. In: *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Fast Sea Transportation (FAST)*, Southampton, UK, pp. 71–80.

- [57] Adgeest, L.J.M., 2008. Response based weather-routing and operation planning of heavy transport vessels.
- [58] Payne, S., Dallinga, R.P., Gaillarde, G., 2005. Queen Mary 2 seakeeping assessment: the owner's requirements, the design verification and operational experience. in Cruise & Ferry.
- [59] Tsujimoto M., Hinnenthal, J., 2008. Optimal navigation for minimizing ship fuel consumption - investigation of route, speed and seakeeping performances. In: Proceedings of the 6th Osaka colloquium on seakeeping and stability of ships, Okaka, Japan, pp. 31–38.
- [60] Magirou, E.F., Psaraftis, H.N., Christodoulakis, N.M., 1992. Quantitative methods in shipping: a survey of current use and future trends. Center for Economic Research, Athens University of Economics and Business, report No. E115.
- [61] <https://www.napa.fi/>
- [62] [https://www.napa.fi/software-and-services/ship-operations/napa-fleet-intelligence/voyage-optimization/?utm\\_source=google\\_ads&utm\\_medium=search&utm\\_campaign=shipping&gclid=Cj0KCQjw1OmoBhDXARIsAAAYGSGl6obRpL\\_KfSCtihao5tdLqhMuJ0ozklgssUHXGT28PLY3Cb9ob94aAneXEALw\\_wcB](https://www.napa.fi/software-and-services/ship-operations/napa-fleet-intelligence/voyage-optimization/?utm_source=google_ads&utm_medium=search&utm_campaign=shipping&gclid=Cj0KCQjw1OmoBhDXARIsAAAYGSGl6obRpL_KfSCtihao5tdLqhMuJ0ozklgssUHXGT28PLY3Cb9ob94aAneXEALw_wcB)
- [63] <https://www.offshorenavigation.com/>
- [64] <https://marine.copernicus.eu/>
- [65] Beşikçi, E. Bal, et al. "An artificial neural network based decision support system for energy efficient ship operations." *Computers & Operations Research* 66 (2016): 393-401.
- [66] Wang, Kai, et al. "Real-time optimization of ship energy efficiency based on the prediction technology of working condition." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 46 (2016): 81-93.

[67] Mao, Wengang, et al. "Statistical models for the speed prediction of a container ship." *Ocean engineering* 126 (2016): 152-162.