



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**  
**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ**  
**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**  
**«ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ**  
**ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ»**

**Πορεία δρομολόγησης πλοίου - Weather routing**

**Θεόδωρος Καραχάλιος**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Υπεύθυνος**

**Ιωάννης Φιλιππόπουλος**

**Λαμία, ... 2017 ...**





**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ**

**ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ «ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ  
ΑΣΦΑΛΕΙΑ, ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΜΕΓΑΛΟΥ ΟΓΚΟΥ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ  
ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ»**

**«ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑ,  
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΜΕΓΑΛΟΥ ΟΓΚΟΥ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ  
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ»**

**Πορεία δρομολόγησης πλοίων – Weather routing**

**Θεόδωρος Καραχάλιος**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Επιβλέπων**

**ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ**

**Λαμία, ... 2017 ...**

«Υπεύθυνη Δήλωση μη λογοκλοπής και ανάληψης προσωπικής ευθύνης»

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, και γνωρίζοντας τις συνέπειες της λογοκλοπής, δηλώνω υπεύθυνα και ενυπογράφως ότι η παρούσα εργασία με τίτλο [Πορεία δρομολόγησης πλοίων – weather routing] αποτελεί προϊόν αυστηρά προσωπικής εργασίας και όλες οι πηγές από τις οποίες χρησιμοποίησα δεδομένα, ιδέες, φράσεις, προτάσεις ή λέξεις, είτε επακριβώς (όπως υπάρχουν στο πρωτότυπο ή μεταφρασμένες) είτε με παράφραση, έχουν δηλωθεί κατάλληλα και ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο/Η ΔΗΛΩΝ/-ΟΥΣΑ

Ημερομηνία

Υπογραφή

## Πορεία δρομολόγησης πλοίων – Weather routing

Θεόδωρος Καραχάλιος

### Τριμελής Επιτροπή:

Όνοματεπώνυμο, ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ

Όνοματεπώνυμο, ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΑΝΤΩΝΗΣ

Όνοματεπώνυμο, ΝΕΣΤΩΡΑΣ ΕΥΜΟΡΦΟΠΟΥΛΟΣ



## Περιεχόμενα

Ονοματολογία	9
Περίληψη	13
1. Εισαγωγή στην δρομολόγηση των πλοίων με βάση τις καιρικές συνθήκες	14
1.1 Ιστορική αναδρομή	17
1.2 Διεθνής Κανονισμοί IMO σχετικά με το Weather Routing	18
1.2.1 Weather Routing	20
1.2.2 Ελάχιστες προδιαγραφές για παροχή υπηρεσιών Weather Routing	20
2. Πρόβλεψη καιρού – Καιρός	22
2.1 Παράμετροι καιρού – Weather routing	22
2.2 Συνοπτική Εκτίμηση του Καιρού	25
2.3 Εκτιμήσεις Έκτακτων Καιρικών και Περιβαλλοντικών Φαινομένων	30
3. Concept of weather routing – fuel consumption	32
3.1 Μοντέλο κατανάλωσης καυσίμου	34
3.1.1 Αποτελεσματική ισχύς	35
3.1.2 Αντίσταση πλοίου	35
3.1.3 Κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση Καυσίμου	36
3.1.4 Αντίσταση σε ήρεμα νερά	39
3.1.5 Αντίσταση που οφείλετε στα κύματα	39
3.1.6 Αντίσταση που οφείλεται στον άνεμο	39
3.2 Επίδραση από τα ωκεάνια ρεύματα	41
3.2.1 Γενικά- Εκτίμηση πιθανότητας κατανομής της ταχύτητας ανέμου	42
3.2.2 Άνεμοι και πρόκληση κυματισμών	44
3.2.3 Απομείωση ταχύτητας πλοίου λόγω κυματισμών	45
3.2.4 Εκτίμηση πιθανοτικής κατανομής για τους χρόνους διαδρομής	47
3.3 Γεωγραφική αποτύπωση της διαδρομής	49
3.4 Υπολογισμός κατανομής πυκνότητας-πιθανότητας ταχύτητας ανέμου για κάθε επιμέρους τμήμα της διαδρομής	49
3.4.1 Εκτίμηση συνολικής κατανομής της ταχύτητας του ανέμου για το ζεύγος προέλευσης – προορισμού	50
3.4.2 Προσδιορισμός της απώλειας ταχύτητας και εκτίμηση της συνολικής κατανομής ταχύτητας πλοίου	51
4. Βελτιστοποίηση και προηγούμενες έρευνες	52
4.1 Τροποποιημένη μέθοδος Isochrone	53
4.2 Υπολογισμός των μεταβολών	54
4.3 Δυναμικός προγραμματισμός	55
5. Υδροδυναμική πλοίων και στατιστικά κυμάτων	56
5.1 Παρουσίαση του πλοίου που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση	57
5.2 Αντίσταση ήρεμων νερών	58
5.3 Πρόωση	62

5.4 Στατιστική μοντελοποίηση των κυμάτων	66
5.5 Ενεργειακό φάσμα των κυμάτων	68
5.6 Υδροδυναμική των κυμάτων και του ανέμου	71
5.6.1 Κινήσεις και επιταχύνσεις σε ακανόνιστες θάλασσες	71
5.6.1.1. Πιθανότητα slamming	74
5.6.1.2. Πιθανότητα πράσινου νερού στο κατάστρωμα	76
5.6.2 Υπολογισμοί μετατοπίσεων και επιταχύνσεις	77
5.6.3. Πρόσθετη αντίσταση λόγω κυμάτων	84
5.6.3.1. Πρόσθετη αντίσταση από τακτικά κύματα	84
5.6.3.2. Προσθετή αντίσταση σε ακανόνιστα κύματα	85
5.6.4. Πρόσθετη αντίσταση λόγω του ανέμου	86
5.6.5. Απώλεια ταχύτητας λόγω κυμάτων και του ανέμου	86
6. Αλγόριθμος βελτιστοποίησης δικτύου και δρομολόγησης	90
6.1. Βελτιστοποίηση του δικτύου	90
6.1.1. Αλγόριθμος Dijkstra	92
6.2. Αλγόριθμος δρομολόγησης	94
6.2.1. Πλοήγηση	94
6.2.2. Σχεδιασμός κόμβων	97
6.2.3. Καθορισμός τόξων	98
6.2.4. Ανάθεση κόστους σε κάθε τόξο	100
7. Υλοποίηση	104
7.1 Ορθοδρομική πλεύση	105
7.1.1 Παρουσίαση υπολογισμών Ορθοδρομικής πλεύσης	106
7.1.1.1 Απόσταση στην Ορθοδρομία	106
7.1.1.2 Διόπτευση	106
7.1.1.3 Ενδιάμεσο σημείο	107
7.2 Λοξοδρομική πλεύση	109
7.2.1 Παρουσίαση υπολογισμών Λοξοδρομικής πλεύσης	110
7.2.1.1 Απόσταση στην Λοξοδρομία	111
7.2.1.2 Διόπτευση	112
7.2.1.3 Ενδιάμεσο σημείο	112
7.3 Λοξοδρομική πλεύση συνυπολογίζοντας τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες	115
7.3.1 Σχεδιασμός κόμβων	115
7.3.2 Ανάθεση κόστους σε κάθε τόξο	118
7.3.3 Εφαρμογή αλγόριθμου Dijkstra	120
7.3.3.1 Πίνακας δεδομένων ανά κόμβο	121
7.3.3.2 Πίνακας Αλγόριθμου Dijkstra	125
7.3.3.3 Πρόγραμμα Dijkstra σε C/C++	126
7.3.3.4 Αποτελέσματα Αλγόριθμου Dijkstra	131
7.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων	133
8 Διαθέσιμα συστήματα δρομολόγησης στην αγορά	134
8.1 Σημαντικότερα συστήματα στην αγορά	134
8.2 Applied algorithms.	136
8.3 Genetic Algorithm	137
9. Επίλογος	140
10. Βιβλιογραφία	141



## Ονοματολογία

$\alpha$	Ύψος πλοίου
$\beta$	Ύψος κύματος
$\eta_0$	Απόδοση προπέλας
$\eta_1$	Μετατόπιση κύματος
$\eta_2$	Μετατόπιση ταλάντωσης
$\eta_3$	Μετατόπιση ανύψωσης
$\eta_4$	Displacement roll
$\eta_5$	Displacement pitch
$\eta_6$	Displacement yaw
$\eta_D$	Propulsive efficiency
$\eta_H$	Hull efficiency
$\eta_M$	Mechanical efficiency
$\eta_R$	Relative rotative efficiency
$\gamma$	Peakedness parameter
$\nabla$	Μετατόπιση όγκου
$\nu$	Kinematic viscosity
$\omega$	Συχνότητα κυμάτων
$\omega_p$	Συχνότητα κορύφωσης κύματος
$T_p$	Μέση μέγιστη περίοδος κύματος
$\rho$	Πυκνότητα νερού
$\rho_A$	Πυκνότητα αέρα

$\varepsilon$	Γωνία φάσης
$\zeta$	Ανύψωση κύματος
$\zeta_{\alpha}$	Πλάτος κύματος
$A_T$	Εγκάρσια προβλεπόμενη περιοχή πάνω από την γραμμή πλεύσης
$A_{33}$	Added mass in heave
$B$	Σχηματισμένο πλάτος
$B_{33}$	Damping in heave BWL Breadth waterline
$C_A$	Συντελεστής συσχέτισης αντίστασης
$C_B$	Block-coefficient
$C_D$	Συντελεστής αντίστασης αέρα
$C_F$	Συντελεστής αντίστασης τριβής
$C_M$	Συντελεστής του πλοίου Midship
$C_P$	Συντελεστής Prismatic
$C_R$	Υπολειμματικός Συντελεστής αντίστασης
$C_T$	Συνολικός συντελεστής αντίστασης
$C_V$	Viscous resistance coefficient
$C_{AA}$	Συντελεστής αντίστασης αέρα
$C_{AW}$	Προστιθέμενος συντελεστής αντίστασης
$C_{BD}$	Συντελεστής αντίστασης βάσης πλοίου
$H$	Ύψος κύματος
$H(\omega)$	Συνάρτηση μεταφοράς
$H_S$	Ύψος κύματος

J	Advance coefficient
$J^*$	Σημείο προώθησης σε πλήρη κλίμακα
k	Αριθμός κυμάτων
$K_Q$	Torque coefficient ροπής
$K_T$	Thrust coefficient ώθησης
$L_{PP}$	Lenght per perpendiculars
$L_{WL}$	Lenght on waterline n Number of propeller revolutions
$P_B$	Δύναμη φρένου
$P_D$	Δύναμη προώθησης
$P_E$	Effective power
Q	Ροπή προπέλας
$R_n$	Reynolds number
$R_{AA}$	Αντίσταση ανέμου
$R_{AW}$	Προστιθέμενη αντίσταση
$R_{Wind}$	Προστιθέμενη αντίσταση κατά την διάρκεια ανέμων
S	Εμπλουτισμένη επιφάνεια.
$S(\omega)$	Φάσμα κύματος
T	Ώθηση προπέλας
T	Περίοδος κύματος
t	Μείωση ώθησης
t	Χρόνος πλεύσης ανάμεσα σε δύο σημεία / ώρα
$T_1$	Μέση περίοδος κύματος
$T_p$	Περίοδος αιχμής κύματος

V	Ταχύτητα πλοίου
$V_A$	Ταχύτητα προπέλας
$V_w$	Ταχύτητα ανέμου
w	Αποτελεσματικά απόνερα wake
ARO	Χειρισμός προστιθέμενης αντίστασης
BSFC	Κατανάλωση καυσίμου brake specific
ECMWF	Ευρωπαϊκό κέντρο για πρόβλεψης καιρού για μικρή περίοδο
FP	Fore perpendicular
GCR	Βέλτιστη κυκλική πορεία
LCB	Longitudinal κέντρο της πλεύσης
RAO	Τελεστής εύρους απάντηση
RMS	Root mean square
TEU	Twenty-foot, ισοδύναμη μονάδα μέτρησης.

## Περίληψη

Η ναυτιλιακή βιομηχανία είναι ένα επιχειρηματικό τοπίο που μεταβλήθηκε πάρα πολύ κατά την τελευταία δεκαετία στα χέρια της παγκόσμιας οικονομίας, τις πιέσεις των κανονισμών και της όξυνσης του κόστους καυσίμων. Η ανάγκη ύπαρξης του λογισμικού weather routing και ο εξορθολογισμός της λειτουργίας του πλοίου είναι ισχυρότερη από ποτέ. Η σημαντική αύξηση των τιμών των καυσίμων κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών και η επικέντρωση στην υπερθέρμανση του πλανήτη έχουν οδηγήσει σε μεγάλο ενδιαφέρον για την μείωση και το είδος των καυσίμων καθώς και στην μείωση των ρύπων που αφορούν τον τομέα της ναυτιλίας. Η μέθοδος του weather routing αποτελεί μια αναγνωρισμένη μέθοδο, που εστιάζει στην μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, καθώς και στη μείωση των εκπομπών ρύπων.

Ο καθορισμός των ταχυτήτων και δρομολογίων για ένα πλοίο απαιτεί στάθμιση πολλαπλών παραγόντων, περιλαμβανομένων των δαπανών – κόστος που αφορά την ναυτιλιακή εταιρεία, την ώρα της άφιξης του πλοίου στον τελικό προορισμό που θα καλύπτει τον μισθωτή του πλοίου, καθώς και το είδος των πλοίων που χρησιμοποιούνται, όπως και την ασφάλεια του φορτίου και του πληρώματος. Για να μπορέσουν να συνδυαστούν όλοι οι παραπάνω παράγοντες και να βρεθεί η βέλτιστη λύση απαραίτητη είναι οι χρήση διάφορων αλγορίθμων που μελετάνε όλους τους παραπάνω παράγοντες και υπολογίζουν την βέλτιστη διαδρομή.

Αυτή η διατριβή παρουσιάζει τη θεωρία πίσω από το weather routing καθώς και την μελέτη των στοιχείων που χρειάζεται και χρησιμοποιεί το διαθέσιμο λογισμικό στην διπλωματική εργασία. Αποσκοπεί επίσης στο να παράσχει στον αναγνώστη μια βασική κατανόηση του τι στοιχεία συνθέτουν ένα εργαλείο δρομολόγησης ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν καθώς και τα αποτελέσματα που αναμένονται να παραχθούν από τον dijkstra που είναι ο αλγόριθμος που θα χρησιμοποιήσουμε στην εργασία.

Σε αυτή τη διατριβή ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται έχει ως στόχο την κατασκευή ενός νέου εργαλείου δρομολόγησης που θα βασίζεται στις καιρικές συνθήκες. Το πρόγραμμα δρομολόγησης καθορίζει τις δυνατότητες δρομολόγησης του πλοίου γύρω από τη γη, αποφεύγοντας καταιγίδες με την επιτάχυνση ή επιβράδυνση καθώς και την αξιοποίηση του καιρού προς όφελος μιας ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης καυσίμου. Επίσης μελετά και μας δίνει την πορεία του πλοίου αν η επιλογή είναι μόνο η πιο σύντομη διαδρομή όσο αφορά τον χρόνο άφιξης του πλοίου στον τελικό προορισμό.

## 1. Εισαγωγή στην δρομολόγηση των πλοίων με βάση τις καιρικές συνθήκες

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών η παρακολούθηση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων, η δρομολόγηση των πλοίων με βάση τις καιρικές συνθήκες και η παροχή υποστήριξης στην λήψη αποφάσεων εν πλω έχουν αναδειχθεί ως τα σημαντικότερα ζητήματα σχετικά με την ασφάλεια και την αξιοπιστία των θαλάσσιων μεταφορών. Τα συστήματα παροχής υποστήριξης στη λήψη αποφάσεων σχετικά με την βελτιστοποίηση της διαδρομής ενός πλοίου με βάση τον καιρό και την κατάσταση της θάλασσας αποτελούν σημαντικά εργαλεία για τη βελτίωση της αξιοπιστίας του θαλάσσιου εμπορίου και την εξασφάλιση της άνεσης και της ασφάλειας του πληρώματος και των επιβατών. Σε γενικές γραμμές μια βέλτιστη διαδρομή διαμορφώνεται με βάση την επιθυμητή ώρα άφιξης, την ελάχιστη κατανάλωση καύσιμου και την μέγιστη ασφάλεια. Αυτό δημιουργεί ένα πολύπλοκο και μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης στο οποίο πρέπει να βρεθεί μία συμβιβαστική λύση ανάμεσα σε αντιτιθέμενους στόχους.

Όταν ένα σκάφος πλέει επηρεάζεται από πολλαπλούς παράγοντες που σχετίζονται με τις καιρικές συνθήκες. Τα κύματα, ο άνεμος και τα ρεύματα επηρεάζουν την ταχύτητα και την κατανάλωση καυσίμων του πλοίου. Ο στόχος του Weather Routing είναι η εύρεση μιας διαδρομής που θα ελαχιστοποιεί το χρόνο, την κατανάλωση καυσίμων και το συνολικό κόστος του ταξιδιού. Το Weather Routing χρησιμοποιείται επίσης για να αποκλείσει συγκεκριμένα δρομολόγια όπου το πλοίο εκτίθεται σε δύσκολα καιρικά φαινόμενα ώστε να αποφευχθούν πιθανές ζημιές στο σκάφος, το φορτίο και το πλήρωμα. Ανάλογα με τον τύπο του σκάφους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά κριτήρια για την αποδεκτή διαδρομή. Κατά τον σχεδιασμό της διαδρομής είναι σημαντικό να βρεθεί μια ισορροπία μεταξύ του ελάχιστου χρόνου / την κατανάλωση καυσίμων και την αποφυγή κακοκαιρίας.

Μερικά συστήματα που υποστηρίζουν το weather routing υπολογίζουν την βέλτιστη διαδρομή χρησιμοποιώντας πληροφορίες σχετικά με τις προβλεπόμενες καιρικές συνθήκες, και μερικές φορές τα γνωστά ρεύματα, κάποια άλλα λαμβάνουν επίσης υπόψη μη μετεωρολογικούς παράγοντες όπως την τιμή των καυσίμων, την ταχύτητα, τις απαιτήσεις του charterer ή τον χρόνο παραμονής του πλοίου σε Emission Control Areas (ECAs). Μια ακόμα διαφορά μεταξύ των συστημάτων είναι η υλικοτεχνική υποστήριξη που προσφέρουν στους διαχειριστές του στόλου: κάποια είναι σε θέση να παρέχουν συμβουλές στους διαχειριστές για τη βέλτιστη ανάπτυξη του συνόλου των πλοίων που έχουν υπό την εποπτεία τους, δεδομένου του εύρους των συγκεκριμένων αποστολών που πρέπει να εκτελεστούν και την επικρατούσα εμπορική κατάσταση.

Το λογισμικό του Weather routing μπορεί εύκολα να εγκατασταθεί ως μέρος των συστημάτων της γέφυρας. Εάν το πλοίο έχει πρόσβαση στο Internet, τακτικές ενημερώσεις μπορεί να αναμεταδίδονται στον καπετάνιο σχετικά με την κατάσταση της θάλασσας και τις καιρικές συνθήκες που το πλοίο θα αντιμετωπίσει. Αυτό καθιστά δυνατό τον σχεδιασμό διαδρομών σύμφωνα με τις απαιτήσεις της

εταιρείας, την εξασφαλίζει ενός ασφαλούς ταξιδιού και τον ακριβή υπολογισμό της ώρας απόπλου του πλοίου ώστε να φτάσει στην ώρα του.

Ο Dr. Hans Christiansen et al. (2007) δήλωσε ότι οι εργασίες των εμπορικών πλοίων συνήθως διαιρούνται σε τρεις τύπους: Σε γραμμικές, σε αδρομολόγητα ή ελεύθερα φορτηγά πλοία και σε βιομηχανικές αποστολές. Στις γραμμικές επιχειρήσεις η διαδρομή είναι σταθερή, και τα λιμάνια που πρέπει να επισκεφθεί το πλοίο είναι προκαθορισμένα. Στα αδρομολόγητα ή ελεύθερα πλοία, το πλοίο ακολουθεί το διαθέσιμο φορτίο, το πλοίο δεν τηρεί καθορισμένο δρομολόγιο. Συνήθως είναι φορτηγά πλοία που ναυλώνονται από τους πλοιοκτήτες τους, κατόπιν ναυλοσυμφώνου σε ένα ναυλωτή που υπό τους όρους του συμβολαίου τα φορτώνουν και καθορίζουν τους λιμένες προσέγγισης φορτοεκφόρτωσης με τις πιθανές ημερομηνίες κατάπλου στον κάθε λιμένα. Το δρομολόγιο αυτών των πλοίων και ο αριθμός των λιμένων προσέγγισης εξαρτάται κυρίως από τις δυνατότητες διάθεσης καταλλήλων φορτίων. Βιομηχανική ναυτιλία σημαίνει ότι ο φορέας εκμετάλλευσης κατέχει τόσο το πλοίο όσο και το φορτίο. Ο στόχος των μεταφορών με ελεύθερα φορτηγά είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους, αλλά για την γραμμική και τη βιομηχανική ναυτιλία, ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί το κόστος.

Οι τιμές των καυσίμων των πλοίων έχουν μεγάλη επίπτωση στις θαλάσσιες μεταφορές και οι προτεραιότητες των πλοιοκτητών αλλάζουν ανάλογα με την τιμή των καυσίμων. Πριν από την πετρελαϊκή κρίση της δεκαετίας του 1970, βασική προτεραιότητα είχαν οι διαδρομές με βάση την χρονική τους διάρκεια. Ωστόσο, όταν οι τιμές των καυσίμων είναι υψηλές, η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου έχει υψηλότερη προτεραιότητα.

Η υπηρεσία Weather Routing είναι τόσο καλή όσο και η ικανότητα πρόβλεψης του καιρού και των μετεωρολογικών γνώσεων και δεξιοτήτων του παρόχου της υπηρεσίας. Ωστόσο, με τις αυξανόμενες βελτιώσεις στη συλλογή και ανάλυση δεδομένων οι πάροχοι προσφέρουν, μοντέλα και προβλέψεις που γίνονται όλο και πιο εξελιγμένα και ακριβή.

Service provider	System	Weather forecast	Planning	Optimization	Warning system	Ship monitoring	Data recording	Vessel tracking
Aerospace and Marine International (USA)	Weather 3000, internet service, maps displaying fleet and weather information	X					X	X
Applied Weather Technology (USA)	BonVoyage System, on-board system	X	X					
Deutscher Wetterdienst (Germany)	MetMaster, MetFerry, ashore routing systems, advice on demand		X	X				
Euronav (UK)	seaPro, on-board system, software or fully integrated bridge system	X	X				X	
Finish Meteorological Institute (Finland)	Weather and routing advice from ashore for the Baltic sea	X	X					
Fleetweather (USA)	Meteorological consultancy from ashore	X	X					X
Force Technology (Denmark)	SeaSense, real-time on-board decision support system managing				X	X	X	
Germanischer Lloyd, Amarcon B.V. (Germany, Netherlands)	Shipboard Routing Assistance System SRAS	X	X		X	X	X	
Meteo Consult (Netherlands)	SPOS, on-board routing system	X	X	X			X	
Metworks Ltd. (UK)	Meteorological consultancy from ashore	X	X					
Norwegian met office, C-Map (Norway, Italy)	C-Star, on-board system	X	X					
Oceanweather INC., Ocean Systems INC. (USA)	Vessel Optimization and Safety System, VOSS, on-board system	X	X	X	X			
Swedish met and hydrology institute (Sweden)	Seaware Routing, Seaware Routing Plus and Seaware EnRoute Live, on-board systems, and support ashore	X	X		X	X	X	
US Navy (USA)	STARS, on-board system	X	X	X		X		
Weather News International, Oceanwaves (USA, Japan)	VPS and ORION, combination of ashore and onboard routing and optimization software	X	X	X				
Weather Routing Inc. (USA)	Routing advice from ashore and Dolphin navigation program combined with a web-based interactive site	X	X					
Transas (UK)	Ship Guard SSAS, on-board system, software or integrated to bridge system	X	X			X	X	X

Table 1.1.: Routing services and support systems, Hinnenthal (2008)



Ο πίνακας. 1.1 μας δίνει μια επισκόπηση των κύριων παρόχων και των υπηρεσιών δρομολόγησης που παρέχουν. Ο πίνακας λήφθηκε από την διατριβή του J.Hinnenthal (2008). Μία τυπική εταιρία Weather Routing, παρέχει υπηρεσίες καθοδήγησης τόσο στην ξηρά όσο και επί του σκάφους. Η εταιρεία εκδίδει μια σύσταση πριν από την αναχώρηση του πλοίου και παρακολουθώντας τη θέση του πραγματοποιεί επανεκτιμήσεις κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Πολλοί οργανισμοί παρέχουν επίσης ανάλυση μετά το πέρας του ταξιδιού, όπου αξιολογούν την απόδοση του πλοίου σε σχέση με την ταχύτητα του, την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές ρύπων. Με αυτές τις πληροφορίες, ο οργανισμός μπορεί να βελτιώσει τις συστάσεις του σχετικά με τη βέλτιστη λειτουργική κατάσταση του πλοίου καθώς και του προγράμματος συντήρησης του. Διάφορα έθνη παρέχουν μετεωρολογικά δεδομένα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την δρομολόγηση των πλοίων. Η εταιρεία Weathernews Inc. είναι η μεγαλύτερη ιδιωτική εταιρεία στον κόσμο παροχής μετεωρολογικών δεδομένων, oceanroutes.com (2013).

### 1.1 Ιστορική αναδρομή

Η έλευση της εκτεταμένης πρόβλεψης καιρού και η ανάπτυξη της επιλεκτικής κλιματολογίας, μαζί με ισχυρές τεχνικές μοντελοποίησης των υπολογιστών, έχουν κάνει τα συστήματα δρομολόγησης των πλοίων δυνατά. Η ικανότητα να συμβουλέψουν αποτελεσματικά τα πλοία να επωφεληθούν τις ευνοϊκές καιρικές συνθήκες παρεμποδίζονταν στο παρελθόν από περιορισμούς στην πρόγνωση και την έλλειψη αποτελεσματικών συστημάτων επικοινωνίας.

Η ανάπτυξη εργασιών στον τομέα της συσσώρευσης δεδομένων και της κλιματολογίας έχει μια μακρά ιστορία. Ο Benjamin Franklin, ως αναπληρωτής Διευθυντής ταχυδρομείου στις βρετανικές αποικίες στη Βόρεια Αμερική, παράγει ένα διάγραμμα του Ρεύματος του Κόλπου από τις πληροφορίες που παρέχονται από τους πλοιάρχους των φαλαινοθηρικών πλοίων της Νέας Αγγλίας. Αυτή η πρώτη χαρτογράφηση του Ρεύματος του Κόλπου συνέβαλε στη βελτίωση της υπηρεσίας του ταχυδρομείου μεταξύ των βρετανικών αποικιών και της Αγγλίας. Σε ορισμένα περάσματα, η ώρα ιστιοπλοΐας μειώθηκε έως και 14 ημέρες.

Στα μέσα του 19ου αιώνα, ο Matthew Fontaine Maury συλλέγει μεγάλες ποσότητες ατμοσφαιρικών και ωκεανογραφικών δεδομένων από ημερολόγια των πλοίων. Για πρώτη φορά, η κλιματολογία των ωκεανών και τα ρεύματα του κόσμου ήταν στη διάθεση των ναυτικών. Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται από τον Maury για την ανάπτυξη εποχικών προτεινόμενων διαδρομών για ιστιοφόρα και για τα πρώτα ατμοκίνητα σκάφη κατά το δεύτερο μισό του 19ου αιώνα. Σε πολλές περιπτώσεις, τα Διαγράμματα του Maury αποδείχτηκαν σωστά από τις μειώσεις στον χρόνο διέλευσης. Ο μέσος χρόνος διέλευσης από την Νέα Υόρκη στην Καλιφόρνια, μέσω της διαδρομής του Cape Horn μειώθηκε από 183 ημέρες σε 139 ημέρες με την χρήση που πρότεινε με τα εποχιακά δρομολόγια του.

Στη δεκαετία του 1950, η έννοια του weather routing στα πλοία τέθηκε σε λειτουργία από αρκετές ιδιωτικές μετεωρολογικές ομάδες και από το Ναυτικό των Η.Π.Α.. Με εφαρμογή των προβλέψεων των διαθέσιμων επιφανειακών και

ανώτερων ατμοσφαιρών σε υπερωκεάνιες αποστολές, ήταν δυνατό να συμβάλλουν αποτελεσματικά στην αποφυγή μεγάλων κακοκαιριών, ενώ σε γενικές γραμμές έπλεαν σε διαδρομές μικρότερες από ό, τι στο παρελθόν. Η ανάπτυξη των υπολογιστών, το διαδίκτυο και η τεχνολογία επικοινωνιών έχει κάνει το weather routing διαθέσιμο σχεδόν σε όλους.

## 1.2 Διεθνής Κανονισμοί IMO σχετικά με το Weather Routing

Η πρακτική της χρήσης προκαθορισμένων διαδρομών για τη ναυτιλία εισήχθη το 1898 και υιοθετήθηκε, για λόγους ασφαλείας, από τις ναυτιλιακές εταιρείες που εκμεταλλεύονται επιβατηγά πλοία σε όλο τον Βόρειο Ατλαντικό. Σχετικές διατάξεις ενσωματώθηκαν στη συνέχεια την αρχική Σύμβαση SOLAS.

Σχέδια διαχωρισμού κυκλοφορίας, και άλλα συστήματα καθοδήγησης των πλοίων έχουν πλέον καθιερωθεί στις περισσότερες περιοχές του κόσμου με μεγάλη συμμόρφωση στη ναυτιλία και ο αριθμός των συγκρούσεων και προσaráξεων έχει μειωθεί δραματικά.

Η ευθύνη του IMO για την δρομολόγηση πλοίων κατοχυρώνεται στη SOLAS κεφάλαιο V, το οποίο αναγνωρίζει τον Οργανισμό ως το μόνο διεθνές όργανο για την καθιέρωση τέτοιων συστημάτων.

Ο κανόνας 10 της COLREG προβλέπει τη συμπεριφορά των πλοίων κατά την πλοήγηση τους μέσα από τα σχέδια διαχωρισμού κυκλοφορίας που έχουν εγκριθεί από τον IMO. Οι ευθύνες του IMO καθορίζονται επίσης σύμφωνα με τη Σύμβαση των Ηνωμένων Εθνών για το Δίκαιο της Θάλασσας (UNCLOS), η οποία ορίζει τον IMO ως «τον αρμόδιο διεθνή οργανισμό» σε θέματα ασφάλειας της ναυσιπλοΐας, της ασφάλειας της κίνησης των πλοίων και της προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Οι κυβερνήσεις που προτίθενται να καθιερώσουν ένα νέο σύστημα οργάνωσης της θαλάσσιας κυκλοφορίας, ή να τροποποιήσουν ένα υπάρχον, πρέπει να υποβάλουν τα προτεινόμενα μέτρα οργάνωσης της θαλάσσιας κυκλοφορίας στην υπό-επιτροπή πλοήγησης, επικοινωνίας, έρευνας και διάσωσης (ΕΚΕΦΕ), του IMO, η οποία στη συνέχεια θα αξιολογήσει την πρόταση και θα κάνει μια σύσταση σχετικά με την έγκριση του. Η σύσταση αυτή στη συνέχεια θα πρέπει να περάσει από την MSC για έγκριση.

Όπως τα σχέδια διαχωρισμού κυκλοφορίας, έτσι και τα άλλα μέτρα οργάνωσης της θαλάσσιας κυκλοφορίας που υιοθέτησε ο IMO για τη βελτίωση της ασφάλειας στη θάλασσα περιλαμβάνουν αμφίδρομες διαδρομές, προτεινόμενες διαδρομές, διαδρομές για βαθιά νερά (προς όφελος κυρίως των πλοίων των οποίων η ικανότητα ελιγμών περιορίζεται από το σχέδιο τους), περιοχές προφύλαξης (όπου τα πλοία πρέπει να πλοηγηθούν με ιδιαίτερη προσοχή), και περιοχές που πρέπει να αποφεύγονται (για λόγους εξαιρετικού κινδύνου ή ιδιαίτερης ευαισθησίας λόγω οικολογικών και περιβαλλοντικών παραγόντων).

Τα συστήματα δρομολόγησης των πλοίων και της θαλάσσιας κυκλοφορίας, συμπεριλαμβανομένων των σχεδίων διαχωρισμού κυκλοφορίας, που έχουν υιοθετηθεί από τον ΙΜΟ, περιέχονται στην πρόσφατη δημοσίευση του ΙΜΟ, τα “Ships’ Routing - currently 2013 Edition”, το οποίο ενημερώνεται όταν τα προγράμματα τροποποιούνται ή προστίθενται νέα.

Η έκδοση περιλαμβάνει γενικές διατάξεις για την δρομολόγηση των πλοίων, οι οποίες αποσκοπούν στην τυποποίηση του σχεδιασμού, την ανάπτυξη, την χαρτογράφηση και τη χρήση της δρομολόγησης των πλοίων σύμφωνα με τα μέτρα που έχει υιοθετήσει ο ΙΜΟ. Οι διατάξεις αναφέρουν ότι ο στόχος της δρομολόγησης των πλοίων είναι να «βελτιώσει την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας σε συγκλίνουσες περιοχές και σε περιοχές όπου η πυκνότητα της κυκλοφορίας είναι μεγάλη ή όπου η ελευθερία της κυκλοφορίας των πλοίων αναστέλλεται λόγω περιορισμένου θαλάσσιου χώρου για μανούβρες, ύπαρξης εμποδίων στην πλοήγηση, περιορισμένο βάθος ή δυσμενών μετεωρολογικών συνθηκών».

Στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε συστήματα καθοδήγησης κυκλοφορίας περιλαμβάνουν:

- **Σύστημα διαχωρισμού της κυκλοφορίας:** Ένα μέτρο δρομολόγησης που αποσκοπεί στο διαχωρισμό των αντίθετων ρευμάτων κυκλοφορίας με τα κατάλληλα μέσα και τη δημιουργία λωρίδων κυκλοφορίας
- **Λωρίδα κυκλοφορίας:** Μία περιοχή εντός καθορισμένων ορίων στην οποία είναι σχεδιασμένος ένας μονόδρομος. Φυσικά εμπόδια, συμπεριλαμβανομένων και εκείνων που αποτελούν ζώνες διαχωρισμού, μπορεί να αποτελέσουν ένα όριο.
- **Ζώνη διαχωρισμού ή γραμμή:** Μία ζώνη ή γραμμή που χωρίζει λωρίδες κυκλοφορίας στις οποίες κινούνται τα πλοία σε αντίθετες ή σχεδόν αντίθετες κατευθύνσεις. Διαχωρίζει τις λωρίδες κυκλοφορίας από την παρακείμενη θαλάσσια περιοχή ή τις λωρίδες κυκλοφορίας που έχουν οριστεί για συγκεκριμένες κατηγορίες πλοίων που κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση.
- **Κυκλική κυκλοφορία:** Ένα σημείο διαχωρισμού ή κυκλικής ζώνης διαχωρισμού και μια κυκλική λωρίδα κυκλοφορίας εντός καθορισμένων ορίων.
- **Παράκτια ζώνη κυκλοφορίας:** Μια καθορισμένη περιοχή μεταξύ του χερσαίου συνόρου ενός συστήματος διαχωρισμού κυκλοφορίας και την παρακείμενη ακτή.
- **Συνιστώμενη διαδρομή:** Μια διαδρομή με απροσδιόριστο πλάτος, για τη διευκόλυνση των διερχόμενων πλοίων, η οποία συχνά χαρακτηρίζεται από σηματοδρές.
- **Διαδρομή βαθέων υδάτων:** Μια διαδρομή εντός καθορισμένων ορίων που έχει με ακρίβεια χαρτογραφηθεί ο βυθός και τα βυθισμένα αντικείμενα.

- **Προφύλαξης περιοχής:** Μια περιοχή εντός καθορισμένων ορίων, όπου τα πλοία πρέπει να πλοηγηθούν με ιδιαίτερη προσοχή και εντός της οποίας μπορεί να συνιστάται η κατεύθυνση της ροής της κυκλοφορίας.
- **Περιοχές που πρέπει να αποφεύγονται:** Μια περιοχή εντός καθορισμένων ορίων στην οποία είτε η πλοήγηση είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη ή είναι εξαιρετικά σημαντικό να αποφευχθούν ατυχήματα και η οποία θα πρέπει να αποφεύγεται από όλα τα πλοία, ή από ορισμένες κατηγορίες πλοίων.

Δείτε επίσης: MSC/Circ.1060 Guidance Note on the Preparation of Proposals on Ships' Routing Systems and Ship Reporting Systems.

### 1.2.1 Weather Routing

Το 1983 ο IMO εξέδωσε το ψήφισμα A.528 (13), σύσταση σχετικά με το Weather Routing, η οποία αναγνωρίζει ότι οι καιρικές συνθήκες επηρεάζουν την θαλάσσια κυκλοφορία και ότι τα πλοία που είναι εφοδιασμένα με τέτοια συστήματα για την αποφυγή κακών καιρικών συνθηκών βοηθούν και στον τομέα της ασφάλειας. Συνιστά στις κυβερνήσεις να συμβουλεύουν τα πλοία που φέρουν τη σημαία τους σχετικά με την διαθεσιμότητα των πληροφοριών καιρού για την βέλτιστη δρομολόγηση των πλοίων, ιδιαίτερα για τις πληροφορίες που παρέχονται από τις υπηρεσίες του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού.

### 1.2.2 Ελάχιστες προδιαγραφές για παροχή υπηρεσιών Weather Routing

Κάθε υπηρεσία Weather Routing που παρέχεται για χρήση στους πλοίαρχους θα πρέπει να συμμορφώνεται με τις ακόλουθες ελάχιστες απαιτήσεις:

1 Ο πλοίαρχος πρέπει να εφοδιάζεται με μετεωρολογικές πληροφορίες για την προτεινόμενη διαδρομή. Οι πρώτες πληροφορίες θα πρέπει, όταν αυτό είναι δυνατό, να παρέχονται πριν το πλοίο αποπλεύσει από το λιμάνι αναχώρησης για να δύναται ο πλοίαρχος να προγραμματίσει το ταξίδι και αν είναι απαραίτητο, να τροποποιήσει την διαδρομή του πλοίου αναλόγως.

2 Στον πλοίαρχο πρέπει να παρέχεται η πηγή των δεδομένων, όπου αυτό είναι δυνατόν, και να αναφέρεται το επίπεδο της ακρίβειας των δεδομένων και η πιθανότητα αλλαγών στις καιρικές συνθήκες.

3 Οι πληροφορίες που παρέχονται πρέπει να περιλαμβάνουν για την θάλασσα και τα "φουσκώματα της" δίνοντας πληροφορίες σχετικά με το ύψους των κυμάτων και, εάν είναι δυνατόν, την κατεύθυνση του "φουσκώματος".

4 Οποιαδήποτε συμβουλή δρομολόγησης θα πρέπει να λαμβάνει πλήρως υπόψη την ταχύτητα και τα χαρακτηριστικά χειρισμού του πλοίου. Θα πρέπει να δοθεί έμφαση στην ικανότητα του πλοίου να αποφύγει καιρικά συστήματα που συνιστούν απειλή για την ασφάλεια του πλοίου και κινούνται γρήγορα σε σχέση με την ταχύτητα του πλοίου.

5 Πριν από την αναχώρηση του πλοίου, θα πρέπει να παρέχονται σαφείς οδηγίες στον πλοίαρχο για τα διαθέσιμα κανάλια επικοινωνίας μεταξύ του πλοίου και της μετεωρολογικής υπηρεσίας δρομολόγησης.

6 Θα πρέπει να παρέχονται συμβουλές δρομολόγησης σε τακτά διαστήματα ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες, την θέση του πλοίου και με την προβλεπόμενη διαδρομή του. Το διάστημα παροχής συμβουλών θα πρέπει να μεταβάλλεται σύμφωνα με το ρυθμό μεταβολής των συνθηκών.

7 Η υπηρεσία θα πρέπει να επιτρέπει στους πλοίαρχους να κάνουν αιτήσεις για παροχή συμβουλών σε ενδιάμεσες περιόδους.

8 Το σύστημα που χρησιμοποιείται πρέπει να είναι αμφίδρομο. Όλες οι παρατηρήσεις των συμβουλών από την υπηρεσία θα πρέπει να απαιτούν μια απάντηση από τον πλοίαρχο. Η ελάχιστη απάντηση πρέπει να περιλαμβάνει την θέση του πλοίου, την πορεία και την ταχύτητα του. Η μορφή της απόκρισης πρέπει επίσης να ενθαρρύνει τον πλοίαρχο να τροφοδοτήσει πίσω πληροφορίες σχετικά με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην θέση του. Οι πλοίαρχοι θα πρέπει επίσης να ενθαρρύνονται να υποδεικνύουν την προτιμώμενη διαδρομή τους λαμβάνοντας υπόψη την επαγγελματική τους κρίση όσον αφορά την ασφάλεια του πλοίου.

9 Οι υπηρεσίες παροχής συμβουλών Weather Routing θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τους:

1. Τα σχετικά συστήματα δρομολόγησης που θα να συναντήσει το πλοίο κατά τη διάρκεια του ταξιδιού.
2. Την ύπαρξη αρκετού θαλάσσιου χώρου για το πλοίο ώστε να εξασφαλίσει ασφαλές πέρασμα σε όλο το ταξίδι.
3. Όλους τους γνωστούς κινδύνους της ναυσιπλοΐας και τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες.
4. Την ανάγκη το πλοίο να λειτουργεί σύμφωνα με τους περιορισμούς που επιβάλλονται για την προστασίας του περιβάλλοντος.
5. Την ανάγκη το πλοίο να λειτουργεί εντός των περιορισμών που προκύπτουν από τη συμμόρφωση με τις Διεθνής Σύμβασης και την γραμμή φόρτωσης και
6. Την ανάγκη για την απαραίτητη συντήρηση του πλοίου που επηρεάζει την ασφαλή λειτουργία του αλλά και μπορεί να οδηγήσει σε παραβίαση των περιβαλλοντικών συνθηκών.

## 2. Πρόβλεψη καιρού – Καιρός

Η πρόγνωση του καιρού στις μέρες μας είναι διαθέσιμη, αλλά περιορίζεται στο πόσο μακριά στο μέλλον μπορεί να προβλέψει τον καιρό αρκετά καλά ώστε τα αποτελέσματα αυτά να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση άντλησης δεδομένων. Λόγω της έλλειψης αξιόπιστων προβλέψεων, κάποιο μέρος του ταξιδιού μπορεί να χρειαστεί να υπολογιστεί με βάση τα στατιστικά που έχουν προκύψει από προηγούμενα έτη για τα μετεωρολογικά φαινόμενα που επικρατούν σε μια περιοχή ανάλογα με τον καιρό που γίνεται το ταξίδι.

Οι προγνώσεις καιρού παρέχονται από τους λεγόμενους παρόχους καιρικών συνθηκών. Δύο παραδείγματα που μπορούμε να αντλήσουμε πληροφορίες για τον καιρό είναι: το Σουηδικό Μετεωρολογικό και Υδρολογικό Ινστιτούτο, (SMHI), και το Μετεωρολογικό Ινστιτούτο της Δανίας, (DMI). Ο πιο συνηθισμένος τρόπος επικοινωνίας που αφορά μετάδοση δεδομένων καιρού για εν πλω συστήματα δρομολόγησης είναι μέσω του ηλεκτρονικού ταχυδρομείου.

Η σωστή πρόβλεψη του καιρού, είναι η πιο σημαντική μεταβλητή για την επίτευξη καλών αποτελεσμάτων στην διαδικασία της δρομολόγησης των πλοίων. Είναι ζωτικής σημασίας μια ναυτιλιακή εταιρεία να έχει πρόσβαση στις βέλτιστες διαθέσιμες μετεωρολογικές προβλέψεις. Δεν είναι μόνο η ακρίβεια που ποικίλλει μεταξύ των παρόχων των μετεωρολογικών δεδομένων αλλά και οι προβλέψεις διαφέρουν αισθητά από πάροχο σε πάροχο. Η ανάλυση καιρού διαφέρει πάνω από τους ωκεανούς αλλά υπάρχει καλύτερη ανάλυση κοντά στην ακτή. Μια μέθοδος για να κρατήσει το μέγεθος των δεδομένων χαμηλό αφού η αποστολή για τα πλοία εν πλω γίνεται μέσω ακριβών συστημάτων δορυφορικής επικοινωνίας ονομάζεται Coarser resolutions .

### 2.1 Παράμετροι καιρού – Weather routing

Ας δούμε ποιες παραμέτρους χρειαζόμαστε για να έχουμε μια σωστή πρόβλεψη για τις καιρικές συνθήκες που θα επικρατούν στην περιοχή που μας ενδιαφέρει:

- Ταχύτητα και διεύθυνση ανέμων.
- Διεύθυνση κυμάτων – ύψος κυμάτων – περίοδος κυμάτων.
- Πρόσφατη Ταχύτητα και διεύθυνση κυμάτων.
- Κατάσταση πάγου: Πάχος πάγου, παρουσία παγόβουνων και περιπλανώμενου πάγου.

### Μετεωρολογικά στοιχεία για τον άνεμο και τα κύματα.

Η πρόβλεψη για τον αέρα περιλαμβάνει ανά περιοχή την μέση κατεύθυνση και ένταση του ανέμου. Το ίδιο ισχύει για την διεύθυνση, την ένταση και την συχνότητα των κυμάτων.

Τα μετεωρολογικά στοιχεία, για τις πρώτες 15 ώρες που δίνονται από τις εταιρίες είναι αποτέλεσμα από την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέγουν από τους τοπικούς μετεωρολογικούς σταθμούς, με βάση το μοντέλο προβλέψεων που έχει υιοθετήσει κάθε οργανισμός και καλύπτουν περιοχές 2 τετραγωνικών μιλίων. Για την περίοδο πρόβλεψης από 16 έως 72 ώρες τα δεδομένα απορρέουν από τα ίδια μοντέλα πρόβλεψης που διαφέρουν όμως από αυτά των 15 ωρών και καλύπτουν περιοχές 6 τετραγωνικών μιλίων.

#### ▪ Περιβαλλοντικοί Παράγοντες

Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες που έχουν σημασία για το weather routing στα πλοία είναι τα στοιχεία εκείνα της ατμόσφαιρας και των ωκεανών που μπορούν να προκαλέσουν μια αλλαγή στην κατάσταση της διέλευσης των πλοίων. Στη δρομολόγηση του πλοίου, λαμβάνονται υπόψη τα στοιχεία που αφορούν τον άνεμο, τις θάλασσες, την ομίχλη, τον πάγο, και τα ρεύματα. Ενώ όλοι οι περιβαλλοντικοί παράγοντες είναι σημαντική για την επιλογή της διαδρομής και την επιτήρηση, η βέλτιστη δρομολόγηση θεωρείται ότι επιτυγχάνεται εάν οι επιδράσεις του ανέμου και της θάλασσας μπορούν να βελτιστοποιηθούν.

**Άνεμος:** Η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου στην απόδοση των πλοίων είναι δύσκολο να προσδιοριστεί. Σε ελαφριούς ανέμους (λιγότερο από 20 κόμβους), τα πλοία χάνουν ταχύτητα σε κόντρα ανέμους και κερδίζουν λίγο ταχύτητα όταν ακολουθούν τους ανέμους. Για υψηλότερες ταχύτητες ανέμου, η ταχύτητα του πλοίου μειώνεται τόσο στους κόντρα όσο και όταν ακολουθούν τους ανέμους. Αυτό οφείλεται στην αυξημένη δράση των κυμάτων, η οποία οδηγεί σε αυξημένη οπισθέλκουσα από τις διορθώσεις με το τιμόνι. Κατά την εξέταση του ανέμου, είναι επίσης απαραίτητο να γνωρίζουμε το εμβადόν του πλοίου. Ισχυροί άνεμοι θα έχουν περισσότερες αρνητικές επιδράσεις σε ένα μεγάλο, πλήρως φορτωμένο πλοίο εμπορευματοκιβωτίων ή μεταφοράς αυτοκινήτων από ένα πλήρως φορτωμένο δεξαμενόπλοιο παρόμοιου μήκους.

**Ύψος Κύματος:** Το ύψος του κύματος είναι βασικός παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση του πλοίου. Η δράση των κυμάτων είναι υπεύθυνη για τις κινήσεις των πλοίων η οποία μειώνει τις προώσεις της προπέλας και προκαλούν αυξημένη αντίσταση στις διορθώσεις με το τιμόνι. Η σχέση της ταχύτητας του πλοίου με την κατεύθυνση και το ύψος του κύματος είναι παρόμοια με εκείνη του ανέμου. Κόντρα κύμα μειώνει την ταχύτητα του πλοίου, ενώ όταν ακολουθούμε το ρεύμα η ταχύτητα του πλοίου αυξάνει ελαφρώς έως ένα ορισμένο σημείο, πέρα από το οποίο θα το επιβραδύνουν. Στην ταραγμένη θάλασσα, ακριβή απόδοση είναι δύσκολο να προβλεφθεί, λόγω των αναπροσαρμογών της πορείας και της ταχύτητας για τον χειρισμό του πλοίου και της άνεσης. Αν και η επίδραση της θάλασσας είναι πολύ μεγαλύτερη για τα μεγάλα εμπορικά σκάφη από ότι είναι η ταχύτητα του ανέμου, είναι δύσκολο να διαχωριστούν σε μια δρομολόγηση πλοίου.

**Ομίχλη:** Η ομίχλη, ενώ δεν επηρεάζει άμεσα τις επιδόσεις του πλοίου, θα πρέπει να αποφεύγεται όσο το δυνατόν περισσότερο, προκειμένου να διατηρείται η κανονική ταχύτητα σε ασφαλείς συνθήκες. Εκτεταμένες περιοχές ομίχλης κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού μπορεί να αποφευχθούν με την επιλογή μιας διαδρομής σε χαμηλότερο γεωγραφικό πλάτος από εκείνη που βασίζεται αποκλειστικά σε άνεμο και θάλασσα. Αν και η διαδρομή μπορεί να είναι μεγαλύτερη, ο χρόνος διέλευσης μπορεί να είναι λιγότερος εξαιτίας στο ότι δεν χρειάζεται να μειωθεί η ταχύτητα λόγω μειωμένης ορατότητας. Επιπλέον, η κόπωση του πληρώματος λόγω της αυξημένης επαγρύπνησης μπορεί να μειωθεί.

**Επίδραση του Βόρειου Τείχους (North Wall Effect):** Κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου και του χειμώνα στο Βόρειο Ημισφαίριο, τα νερά στα βόρεια του Ρεύματος του Κόλπου, στο Βόρειο Ατλαντικό, είναι στο ψυχρότερο τους, ενώ το ίδιο το Ρεύμα του Κόλπου παραμένει σε σταθερή σχετικά ζεστή θερμοκρασία. Το πέρασμα μίας ισχυρά κρύας αέρας μάζας μπροστά ή πίσω από το Ρεύμα του Κόλπου οδηγεί στην ανάπτυξη ενός παράκτιου συστήματος χαμηλής πίεσης. Αρκετά συχνά Αρκτικός αέρας αποτραβιέται στα ανοικτά των μεσω-Ατλαντικών ακτών των Ηνωμένων Πολιτειών και πάνω από τα ζεστά νερά του Ρεύματος του Κόλπου. Αυτός ο ψυχρός αέρας θερμαίνεται καθώς διέρχεται πάνω από το Ρεύμα του Κόλπου, με αποτέλεσμα την ταχεία και έντονη εμβάθυνση του συστήματος χαμηλής πίεσης και υψηλότερους από την κανονική επιφάνεια ανέμους. Υψηλότερα κύματα και συγκεχυμένη θάλασσα απορρέουν από αυτούς τους ανέμους. Όταν αυτοί οι άνεμοι αντιταχθούν στα βορειοανατολικά του ρεύματος, το αποτέλεσμα είναι αυξημένο ύψος κύματος και συντόμευση της περιόδου του κύματος. Αν το αντίθετο ρεύμα είναι επαρκώς ισχυρό, τα κύματα θα σπάσουν. Αυτά τα φαινόμενα είναι συλλογικά και ονομάζονται «Επίδραση του Βόρειου Τείχους (North Wall Effect)», παραπέμποντας στην περιοχή με την πιο δραματική εναλλαγή θερμοκρασίας μεταξύ του κρύου νερού στα βόρεια και του ζεστού νερού του Ρεύματος του Κόλπου προς τα νότια. Η πιο επικίνδυνη πτυχή του φαινομένου αυτού είναι ότι ισχυροί άνεμοι και εξαιρετικά υψηλά, απότομα κύματα εμφανίζονται σε μια περιορισμένη περιοχή τα οποία μπορεί να αναπτυχθούν χωρίς προειδοποίηση. Έτσι, ένα πλοίο που ήδη πλέει σε σχεδόν θυελλώδεις βόρειους ανέμους και τρικυμιώδης θάλασσα, προχωρώντας σε βόρεια πορεία, μπορεί ξαφνικά να αντιμετωπίσει πολύ δυνατούς ανέμους και επικίνδυνα υψηλά απότομα κύματα. Πολλά είναι τα πλοία που ναυάγησαν στα ανοικτά της Βόρειας Αμερικής καθώς προσέγγιζαν την θέση του Βόρειου Τοίχους. Ένα παρόμοιο φαινόμενο συμβαίνει στο Βόρειο Ειρηνικό κοντά στο Ρεύμα του Kuroshio και της Νοτιοανατολικής αφρικανικής ακτής κοντά στο Ρεύμα του Agulhas.

**Ωκεάνια Ρεύματα:** Τα ωκεάνια ρεύματα δεν παρουσιάζουν σημαντικό πρόβλημα δρομολόγησης, αλλά μπορεί να είναι ένας καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή διαδρομής και εκτροπής. Αυτό συνήθως ισχύει όταν τα σημεία



αναχώρησης και προορισμού βρίσκονται σε σχετικά χαμηλά γεωγραφικά πλάτη. Οι σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να αξιολογηθούν είναι η διαφορά της απόστασης μεταξύ μιας μεγάλης κυκλικής διαδρομής και μιας διαδρομής που επιλέγεται για βέλτιστο ρεύμα, με την αναμενόμενη αύξηση της ταχύτητας από το ακολουθούμενο ρεύμα, καθώς και η μειωμένη πιθανότητα μιας εκτροπής εξαιτίας του καιρού και της θάλασσας στο κατώτερο γεωγραφικό πλάτος. Για παράδειγμα, μια διαδρομή που περνάει κοντά από τον άξονα του Ισημερινού μπορεί να είναι πρακτική, διότι η αυξημένη απόσταση αντισταθμίζεται από ευνοϊκό ρεύμα. Η κατεύθυνση και η ταχύτητα των ρευμάτων των ωκεανών είναι πιο προβλέψιμοι από τον άνεμο και τις θάλασσες, αλλά κάποια μεταβλητότητα μπορεί να υπάρχει. Σημαντικά ωκεάνια ρεύματα μπορούν να διαταραχθούν για αρκετές ημέρες από πολύ έντονα καιρικά συστήματα, όπως τυφώνες και από παγκόσμια φαινόμενα όπως το Ελ Νίνιο.

**Πάγος:** Το πρόβλημα του πάγου είναι διττό: επιπλέοντα παγόβουνα και πάγος στο κατάστρωμα. Εάν είναι δυνατόν, τις περιοχές των παγόβουνων θα πρέπει να τις αποφεύγουμε λόγω της δυσκολίας της ανίχνευσης και της πιθανότητας της σύγκρουσης. Ο πάγος καταστρώματος μπορεί να προκαλείται από χαμηλές θερμοκρασίες που σχετίζονται με ένα μεγάλο σύστημα καιρού. Ενώ ως επί το πλείστον είναι ένας ενοχλητικός παράγοντας σε μεγάλα πλοία, μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα στην σταθερότητα των μικρών σκαφών.

## 2.2 Συνοπτική Εκτίμηση του Καιρού

Μια υπηρεσία δρομολόγησης πλοίου θα πρέπει να κατευθύνει τις δεξιότητες της στην πρόβλεψη για την αποφυγή ή τον περιορισμό της επίδρασης των καιρικών και θαλάσσιων συνθηκών που συνδέονται με υπέρ τροπικά συστήματα χαμηλής πίεσης στα μεσαία και μεγάλα γεωγραφικά πλάτη και τα τροπικά συστήματα σε μικρά γεωγραφικά πλάτη. Ο εποχιακός καιρός ή μουσώνες είναι επίσης ένας παράγοντας στην επιλογή της διαδρομής και εκτροπής σε ορισμένες περιοχές.

Παρά την προσοχή και δημοσιότητα που δίνεται στους τροπικούς κυκλώνες, συστήματα χαμηλής πίεσης σε μεσαία γεωγραφικά πλάτη παρουσιάζουν γενικά πιο δύσκολα προβλήματα σε μια υπηρεσία δρομολόγησης πλοίου. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι τα μεγάλα πλοία κυκλοφορίας που πλέουν μεταναστεύουν σε χαμηλής πίεσης συστήματα, και η πιθανή έκθεση σε έντονα καιρικά συστήματα, ειδικά το χειμώνα, είναι πολύ μεγαλύτερη.

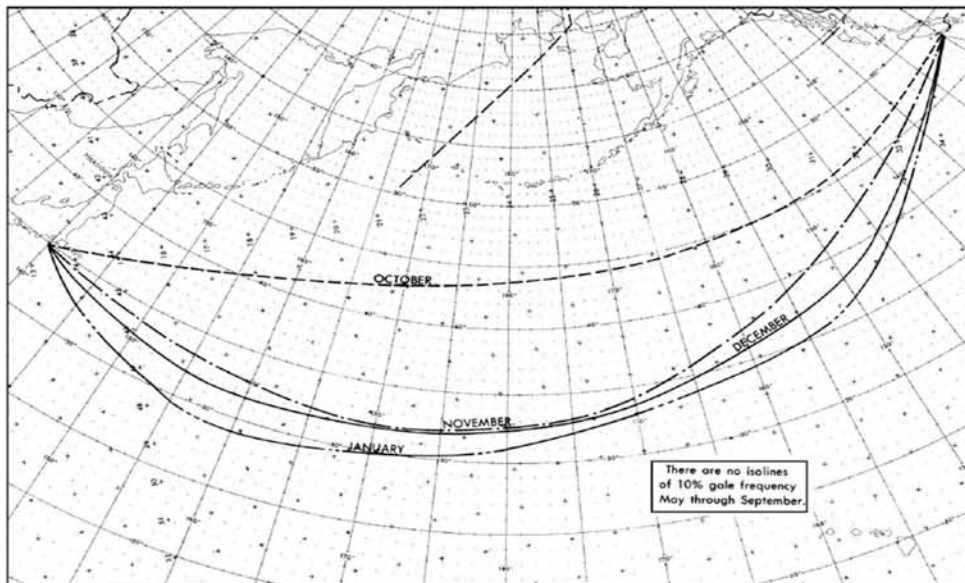
Συστήματα χαμηλής πίεσης με ασθενέστερη ένταση από τους θυελλώδεις ανέμους (άνεμοι λιγότερο από 34 κόμβους) δεν είναι ένα σοβαρό πρόβλημα για τα περισσότερα πλοία. Ωστόσο, ένα σχετικά ασθενές σύστημα μπορεί να δημιουργήσει μια παρατεταμένη περίοδο θαλασσοταραχής που ενδέχεται να παρεμποδίζει την

κανονική λειτουργία των πλοίων. Το weather routing μπορεί συχνά να περιορίσει τις σκληρές συνθήκες σε σύντομο χρονικό διάστημα και να παρέχει περισσότερες ευνοϊκές συνθήκες για το μεγαλύτερο μέρος της διέλευσης. Σχετικά μικρά σκάφη, ρυμουλκά, σκάφη αναψυχής και πλοία με ευαίσθητα φορτία μπορούν να επηρεαστούν σημαντικά από ασθενέστερα καιρικά συστήματα από την ένταση θύελλας. Χρησιμοποιώντας μια υπηρεσία δρομολόγησης μπορούμε να ενισχύσουμε τόσο την ασφάλεια όσο και την αποτελεσματικότητα. Θύελλες (άνεμοι 34-47 κόμβους) και καταιγίδες (άνεμοι μεγαλύτεροι από 48 κόμβους) στην ανοικτή θάλασσα μπορούν να δημιουργήσουν πολύ ταραχώδη ή φουσκωμένη θάλασσα, ιδιαίτερα όταν ένα αντίθετο ρεύμα, όπως το Ρεύμα του Κόλπου εμπλέκεται. Αυτό μπορεί να αναγκάσει σε μείωση της ταχύτητας προκειμένου να αποκτήσουμε μια πιο άνετη και ασφαλή οδήγηση. Εξαιτίας της εκτεταμένης γεωγραφικής περιοχής που καλύπτεται από ένα καλά αναπτυγμένο σύστημα χαμηλής πίεσης, αφού η ταχύτητα του πλοίου μειωθεί η ικανότητα για βελτίωση της κατάστασης του πλοίου μειώνεται σοβαρά. Έτσι, η έκθεση σε πιθανή βλάβη και κίνδυνο αυξάνεται σημαντικά.

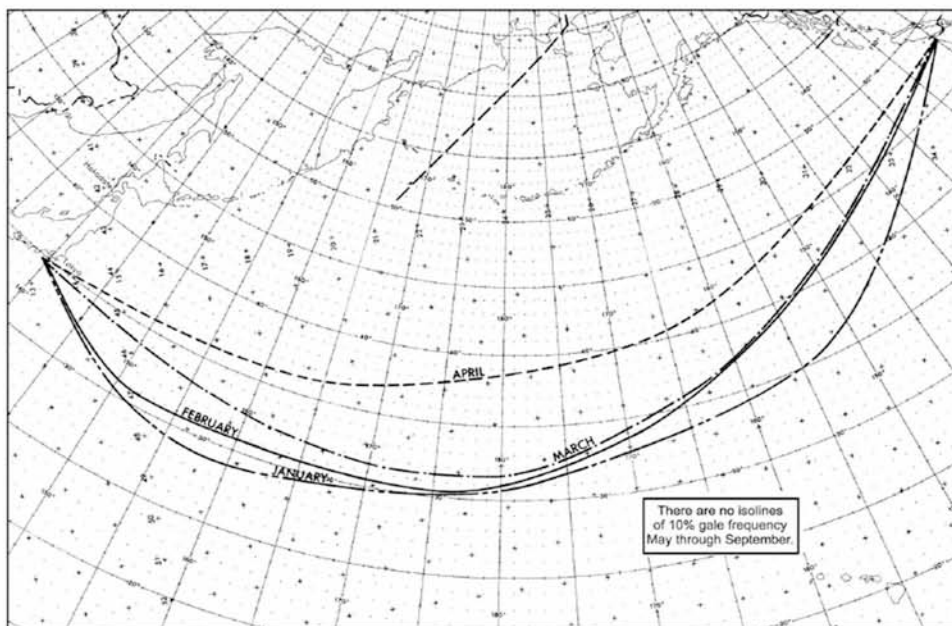
Μια σύσταση για μια εκτροπή από την υπηρεσία δρομολόγησης πολύ πριν από τα έντονα καιρικά φαινόμενα θα περιορίσει τη διάρκεια της έκθεσης του σκάφους. Εάν είναι αποτελεσματική, η ταχύτητα του πλοίου δεν θα μειωθεί και θα διατηρηθεί μια ικανοποιητική πρόοδος ακόμα και αν η απόσταση που απομένει για τον προορισμό μας αυξηθεί. Ο συνολικός χρόνος διέλευσης είναι συνήθως μικρότερος από ότι αν δεν γίνει αλλαγή της διαδρομής και το πλοίο παραμένει στις δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Σε μερικές περιπτώσεις οι εκτροπές γίνονται για την αποφυγή δυσμενών καιρικών συνθηκών και για συντόμευση της διαδρομής ταυτόχρονα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση χρόνου και κόστους.

Σε πολύ έντονα συστήματα χαμηλής πίεσης, με ισχυρούς ανέμους και μακράς διάρκειας, φουσκωμένες θάλασσες θα δημιουργηθούν σε μεγάλες αποστάσεις. Ακόμη και με μια εκτροπή, είναι δύσκολο να αποφευχθούν αποτελεσματικά οι δυσμενείς συνθήκες.

Αυτά φαίνονται στα παρακάτω σχήματα για τον Ειρηνικό ωκεανό:



Γενικευμένη συχνότητα ισοϋψών των θυελλωδών ανέμων για τον Οκτώβριο μέχρι Ιανουάριο.

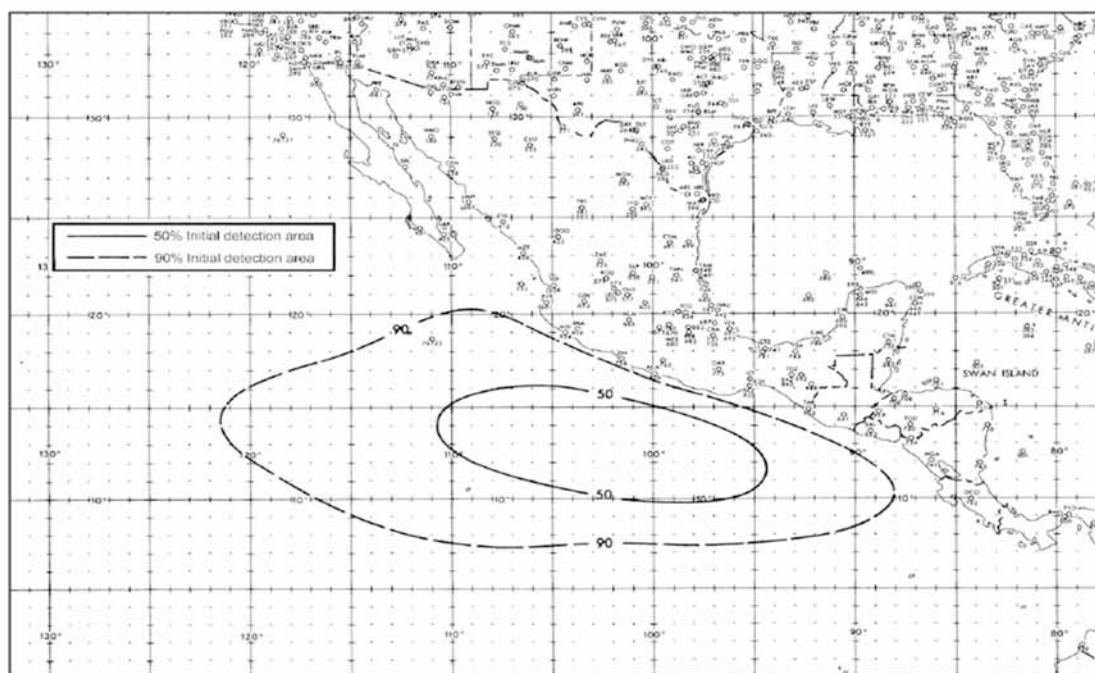


Γενικευμένη συχνότητα ισοϋψών των θυελλωδών ανέμων για τον Ιανουάριο μέχρι τον Απρίλιο.

Για να αποφύγουμε την περιοχή με σημαντικές θύελλες στον Ατλαντικό από τον Οκτώβριο μέχρι τον Απρίλιο, το γεωγραφικό πλάτος διέλευσης είναι γενικά χαμηλότερο από τον τριακοστό παράλληλο.

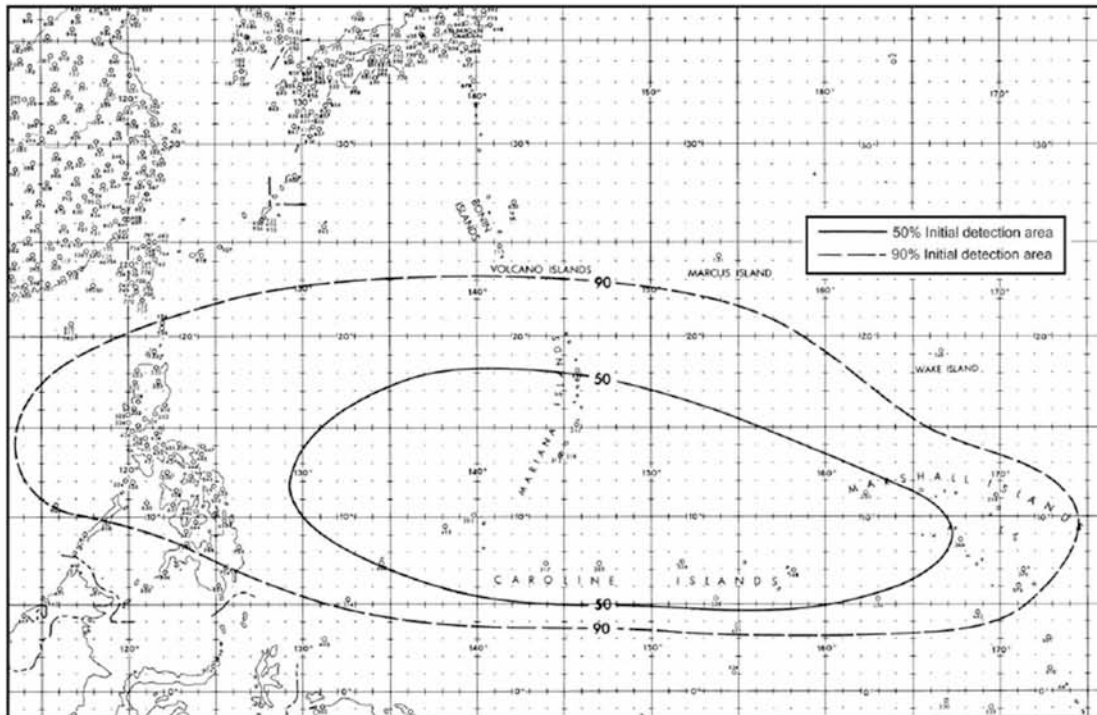
Οι περιοχές, οι εποχές, και η πιθανότητα της ανάπτυξης των τροπικών κυκλώνων είναι αρκετά καλά προσδιορισμένοι σε κλιματολογικές δημοσιεύσεις. Σε μακροπρόθεσμους σχεδιασμούς, σημαντικό πλεονέκτημα μπορούμε να αποκτήσουμε με τον περιορισμό της έκθεσης μας σε πιθανούς κινδύνους των τροπικών συστημάτων.

Στο Βόρειο Ειρηνικό, αποφεύγουμε τις περιοχές με τη μεγαλύτερη πιθανότητα σχηματισμού τροπικού κυκλώνα. Αποφεύγοντας τους υπάρχοντες τροπικούς κυκλώνες με ιστορικό 24 ωρών ή περισσότερο από εξάωρες προειδοποιήσεις στις περισσότερες περιπτώσεις είναι σχετικά απλό. Ωστόσο, όταν διέρχεται από την περιοχή παραγωγής τροπικού κυκλώνα, το πλοίο υπό δρομολόγηση μπορεί να παρέχει την πρώτη έκθεση για τις περιβαλλοντικές συνθήκες υποδεικνύοντας αν μια νέα διαταραχή αναπτύσσεται. Στο ανατολικό Βόρειο Ειρηνικό η περιοχή παραγωγής για ένα υψηλό ποσοστό τροπικών κυκλώνων είναι σχετικά πυκνό (σχήμα). Παραμένουν νοτίως της γραμμής που εκτείνεται από το γεωγραφικό πλάτος:  $9^{\circ}$ - $14^{\circ}$ N και μήκος  $90^{\circ}$ - $115^{\circ}$ W.



Περιοχή ανίχνευσης υψηλού ποσοστού των τροπικών κυκλώνων που αργότερα αναπτύχθηκαν σε τυφώνα, 1957-1974.

Στο δυτικό Βόρειο Ειρηνικό είναι σκόπιμο να μείνουμε βορείως του 22 βορείου παράλληλου, όπου είναι γνωστό ότι δεν υπάρχουν τροπικά συστήματα. Δείτε το σχήμα.



Περιοχή ανίχνευσης υψηλού ποσοστού των τροπικών κυκλώνων που αργότερα αναπτύχθηκαν σε τυφώνα, 1946-1973. Στον Ατλαντικό, πλέουμε κοντά στον άξονα των Βερμούδων προς βορρά για να αποφύγουμε την περιοχή του σχηματισμού των τροπικών κυκλώνων.

Έχει αποδειχθεί εξίσου επωφελής να χρησιμοποιούμε παρόμοιες εκτιμήσεις για τη δρομολόγηση στις περιοχές των μουσώνων του Ινδικού Ωκεανού και της Θάλασσας της Νότιας Κίνας. Αυτό επιτυγχάνεται με την παροχή διαδρομών και παρακάμψεων που γενικά αποφεύγουν τις υψηλής συχνότητας περιοχές με θυελλώδεις ανέμους και ταραγμένες θάλασσες όσο το δυνατόν περισσότερο. Τα πλοία μπορούν στη συνέχεια να παραμείνουν σε ικανοποιητικές συνθήκες με περιορισμένη αύξηση της απόστασης διαδρομής.

Ανάλογα με τα σημεία αναχώρησης και προορισμού, υπάρχουν πολλοί συνδυασμοί διαδρομών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν διερχόμαστε από το βόρειο Ινδικό Ωκεανό (Αραβική Θάλασσα, Κόλπος της Βεγγάλης) και τη Θάλασσα της Νότιας Κίνας. Για παράδειγμα, στην Αραβική Θάλασσα κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μουσώνων, δρομολόγια από και προς την Ερυθρά Θάλασσα, στο Δυτικό Ειρηνικό, και το ανατολικό Ινδικό Ωκεανό πρέπει να είναι πολύ κοντά στον ισημερινό. Πλοία με πορεία στον Περσικό Κόλπο κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου κινούνται νοτιότερα και δυτικότερα ώστε να έχουν τις φουρτουνιασμένες θάλασσες στην πρύμνη όταν διερχόμαστε από την Αραβική Θάλασσα. Τα πλοία που κατευθύνονται ανατολικά και αναχωρούν από το Περσικό Κόλπο μπορούν να προχωρήσουν γενικά ανατολικά-νοτιοανατολικά προς την ινδική υπο-ήπειρο, και στη συνέχεια νότια, για να περάσουν βόρεια και ανατολικά των φουσκωμένων

θαλασσών νοτιοδυτικά της Αραβικής Θάλασσας. Τα πλοία που κατευθύνονται δυτικά από τον Περσικό Κόλπο για το Ακρωτήριο Καλής Ελπίδας φαίνεται να έχουν ελάχιστη δυνατότητα επιλογής σε διαδρομές, εκτός και αν προσθέσουμε σημαντική απόσταση στη διέλευση με πέρασμα ανατολικά από τις φουσκωμένες θάλασσες. Στους χειμερινούς μουσώνες, δρομολόγια προς ή από την Ερυθρά Θάλασσα για το δυτικό Ειρηνικό και τον Ινδικό Ωκεανό πραγματοποιούνται βορειότερα στην Αραβική Θάλασσα για να αποφευχθούν οι φουσκωμένες θάλασσες. Πλοία με πορεία στον Περσικό Κόλπο από το δυτικό Ειρηνικό και ανατολικό Ινδικό Ωκεανό διατηρούνται περισσότερο προς ανατολάς όταν προχωρούν βόρεια στην Αραβική Θάλασσα. Τα πλοία που αναχωρούν από την περιοχή του Περσικού Κόλπου θα έχουν σημαντικά λιγότερη δυσκολία από ότι κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μουσώνων. Παρόμοιες σκέψεις μπορούν να δοθούν στην δρομολόγηση πλοίων που κινούνται προς και από τον Κόλπο της Βεγγάλης.

Στη Θάλασσα της Νότιας Κίνας, οι διελεύσεις μέσω του Περάσματος Palawan συνιστώνται όταν ισχυροί, κόντρα άνεμοι και θάλασσες προβλέπονται. Αυτό είναι ιδιαίτερα αληθές στη διάρκεια των χειμερινών μουσώνων. Κατά περιόδους, όταν η κύρια ροή των μουσώνων είναι χαλαρή, τα πλοία μπορούν να χρησιμοποιήσουν τη συντομότερη διαδρομή όσο επιτρέπουν οι συνθήκες.

### **2.3 Εκτιμήσεις Έκτακτων Καιρικών και Περιβαλλοντικών Φαινομένων**

Εκτός από τις συνοπτικές εκτιμήσεις του καιρού στο weather routing του πλοίου, υπάρχουν ειδικά περιβαλλοντικά προβλήματα που μπορούν να αποφευχθούν με τις ακόλουθες συστάσεις και προειδοποιήσεις των υπηρεσιών δρομολόγησης πλοίου. Αυτά τα προβλήματα καλύπτουν γενικά μικρότερες γεωγραφικές περιοχές και είναι εποχικού χαρακτήρα, αλλά εξακολουθούν να είναι σημαντικά για την δρομολόγηση του πλοίου.

Στον Βόρειο Ατλαντικό, λόγω της βαριάς ναυτιλιακής κυκλοφορίας, συχνά κακή ορατότητα από βροχή ή ομίχλη και περιορισμένη πλοήγηση, κυρίως στα ανατολικά του Στενού Ντόβερ, κάποιιοι ναυτικοί προτιμούν την διέλευση προς ή από τη Βόρεια Θάλασσα μέσω του Pentland Firth, περνώντας βόρεια από τα βρετανικά νησιά και όχι μέσω του Αγγλικού Καναλιού.

Το weather routing στα πλοία γενικά αποφεύγει τις περιοχές πυκνής ομίχλης με χαμηλή ορατότητα στην περιοχή του Grand Banks στα ανοικτά του Newfoundland και την περιοχή ανατολικά της Ιαπωνίας βορείως των 35° N. Τα αλιευτικά σκάφη στους δύο αυτούς τομείς παρέχουν πρόσθετο κίνδυνο. Αυτή η κατάσταση υπάρχει κατά κύριο λόγο από τον Ιούνιο μέχρι το Σεπτέμβριο. Αρκτικά πλοία εφοδιασμού καθ' οδόν από τις Ανατολικές ακτές των ΗΠΑ στην περιοχή του στενού Davis-Baffin Bay το καλοκαίρι συχνά επιλέγουν η διέλευση τους να γίνεται μέσω του Στενού Cabot και του Στενού του Belle Isle, όπου περισσότερα βοηθήματα

πλοήγησης είναι διαθέσιμα και η κίνηση των παγόβουνων είναι χαρτογραφημένη. Τα παγόβουνα είναι ένας σαφής κίνδυνος στο Βόρειο Ατλαντικό από τα τέλη Φεβρουαρίου έως τον Ιούνιο, και μερικές φορές αργότερα. Ο κίνδυνος από επιπλέοντα παγόβουνα σε συνδυασμό με την περιορισμένη ορατότητα λόγω ομίχλης είναι συχνός. Οι αναφορές και προειδοποιήσεις της Διεθνούς Περιπολίας Πάγων έχουν ενσωματωθεί στο σχεδιασμό των διαδρομών για να αποφευχθούν με ασφάλεια επικίνδυνες περιοχές παγόβουνων. Είναι συνήθως απαραίτητο να μείνουμε νότια τουλάχιστον των 45° N μέχρι και νοτιοανατολικά του νησιού του Newfoundland. Το γραφείο δρομολόγησης του Ναυτικού των ΗΠΑ στο Ναυτικό Κέντρο Ατλαντικού, Μετεωρολογίας και Ωκεανογραφίας στο Norfolk διατηρεί ένα περιθώριο ασφαλείας τουλάχιστον 100 μιλίων από παγόβουνα που αναφέρθηκαν από την Διεθνή Περιπολία Πάγων. Επίσης, σε ένα δριμύ χειμώνα, το Στενό της Δανίας μπορεί να κλείσει με πάγο.

Στο χειμωνιάτικο βόρειο ημισφαίριο, ένα ισχυρό σύστημα υψηλής πίεσης που κινείται νοτιοανατολικά από τα Rocky Mountains φέρνει κρύο αέρα προς τα κάτω σε ολόκληρη την Κεντρική Αμερική και το δυτικό Κόλπο του Μεξικού όπου παράγονται θυελλώδεις άνεμοι στο Κόλπο του Tehuantepec. Μία προσαρμογή στην πορεία του πλοίου μπορεί να αποφύγει επιτυχώς τις φουσκωμένες θάλασσες που συνδέονται με την «Tehuantepecer." Για τη διέλευση μεταξύ της Διώρυγας του Παναμά και των βορειοδυτικών λιμένων του Ειρηνικού, λίγη επιπλέον απόσταση απαιτείται για να αποφευχθεί αυτή η περιοχή το χειμώνα παραμένοντας νότια τουλάχιστον των 12°N κατά τη διέλευση των 97°W. Αποφεύγοντας τις φουσκωμένες θάλασσες, κάποιες δυσμενής συνθήκες μπορεί να συναντήσουμε νότια από αυτή τη γραμμή. Πλοία που διέρχονται μεταξύ της Διώρυγας του Παναμά και τα λιμάνια της δυτικής ακτής της Βόρειας Αμερικής μπορούν να μείνουν κοντά στις ακτές του Κόλπου του Tehuantepec για να αποφύγουν τις τρικυμίες κατά τη διάρκεια της θύελλας, αλλά μπορούν να εξακολουθούν να αντιμετωπίζουν δυνατούς υπεράκτιους ανέμους.

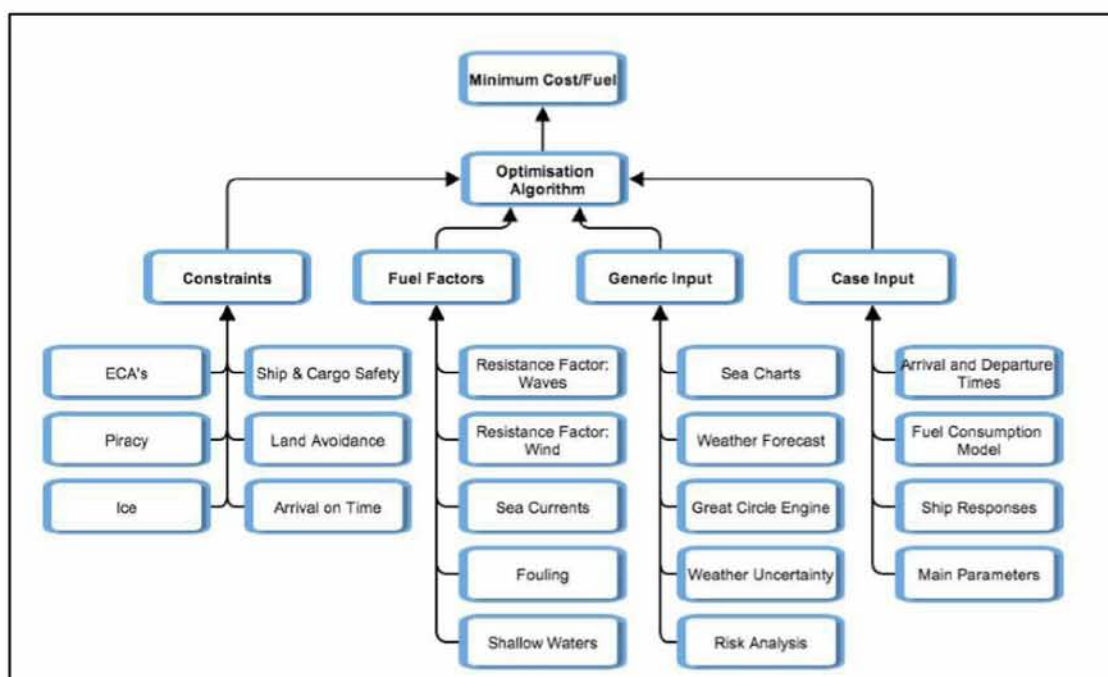
Το καλοκαίρι, τα ημι-μόνιμα συστήματα υψηλής πίεσης πάνω από τους ωκεανούς παράγουν ισχυρές ροές προς τον ισημερινό κατά μήκος των δυτικών ακτών των ηπείρων. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι πιο σαφές στα ανοικτά των ακτών της Καλιφόρνιας και της Πορτογαλίας στο Βόρειο Ημισφαίριο και κατά μήκος της Χιλής, Δυτικής Αυστραλίας, και νοτιοδυτικά της Αφρικής στο νότιο ημισφαίριο. Όταν διερχόμαστε από τις περιοχές αυτές δημιουργούνται μεγάλες τρικυμίες και θεωρείται σημαντικός παράγοντας στην επιλογή διαδρομής ή εκτροπής.

### 3. Concept of weather routing – fuel consumption

Το weather routing, είναι μια διαδικασία υπολογισμού της βέλτιστης διαδρομής και ενδεχομένως, του υπολογισμού της βέλτιστης ταχύτητας του πλοίου για ένα ταξίδι λαμβάνοντας υπόψη τον καιρό. Η κύρια χρήση του, είναι για τον υπολογισμό της πορείας των εμπορικών πλοίων, αλλά χρησιμοποιείται και στην ακτοπλοΐα. Ο κύριος στόχος του weather routing είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους και του χρόνου καθώς και η ακεραιότητα του εμπορεύματος κατά την διάρκεια του ταξιδιού. Λέγοντας ελαχιστοποίηση του κόστους μιας διέλευσης εννοούμε να περιορίσουμε τα έξοδα που πρέπει να γίνουν, για παράδειγμα τα καύσιμα, το πλήρωμα και το κόστος κεφαλαίου. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούμε για στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης του καυσίμου.

Αυτό το κεφάλαιο έχει ως στόχο να δώσει στον αναγνώστη μια επισκόπηση του weather routing. Εστιάζει και ασχολείται με τα στοιχεία που απαιτούνται για να γίνει σωστή πρόβλεψη της πορείας του πλοίου καθώς και τις προκλήσεις που έχουν να αντιμετωπίσουν όταν προσπαθούν να βελτιστοποιήσουν τα δρομολόγια των πλοίων.

Ας παρατηρήσουμε το παρακάτω διάγραμμα για να πάρουμε μια γενική εικόνα από τους παράγοντες που επηρεάζουν την δρομολόγηση των πλοίων και την εύρεση της καλύτερης – πιο αποτελεσματικής διαδρομής. (εικόνα 1).



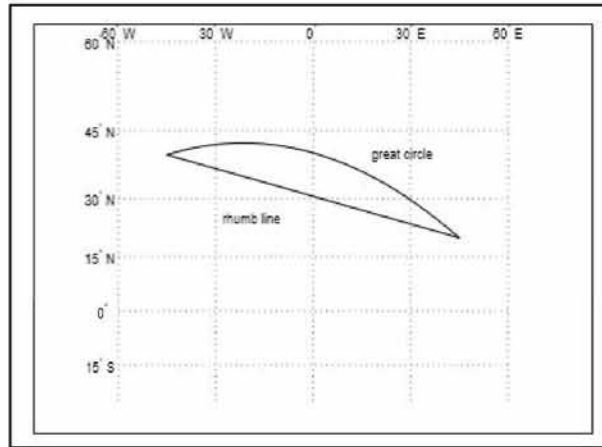
Αναφερόμενος στην Εικόνα 1, ο κύριος στόχος της είναι ο υπολογισμός καθώς και τα στοιχεία που παίρνουμε για την διαδρομή που απαιτεί ελάχιστο κόστος - καυσίμου. Για να επιτευχθεί αυτό, ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης υλοποιείται λαμβάνοντας υπόψη διάφορους παράγοντες. Η βελτιστοποίηση μπορεί



να θεωρηθεί ότι βασίζεται σε τέσσερις κύριους τομείς, περιορισμούς, που είναι παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση καυσίμου. Σε περίπτωση που οι περιορισμοί περιλαμβάνουν τους ιδιαιτερότητες που υπάρχουν σε μια διαδρομή, δηλαδή το είδος των καυσίμων που επιτρέπεται να χρησιμοποιηθούν, τους περιβαλλοντικούς παράγοντες, καθώς και τα επίπεδα εκροής διοξειδίου του άνθρακα που επιτρέπονται. Γενικά δεδομένα είναι τα δεδομένα που δεν αφορούν το πλοίο και ειδικά δεδομένα αυτά που αφορούν το πλοίο και το συγκεκριμένο ταξίδι.

Η αντιμετώπιση των πιο γενικών στοιχείων σχετικά με την πλοήγηση των πλοίων ή η χρήση των ναυτικών χαρτών πρέπει να αναφέρονται. Αυτά που είναι πιο συχνά ενσωματώνονται στο σύστημα ECDIS (Σύστημα Πληροφοριών ηλεκτρονικής απεικόνισης χαρτών). Μέχρι πρόσφατα, ήταν απαίτηση από τους υπεύθυνους φορείς να υπάρχουν στο σκάφος εκτυπωμένα αυτά τα διαγράμματα. Τα συστήματα ECDIS μαζί με τα εφεδρικά συστήματα τους είναι τώρα πιστοποιημένα και κατάλληλα για την χρήση τους στο σκάφος χωρίς την απαίτηση των τυπωμένων διαγραμμάτων. Τα διαγράμματα ECDIS που χρησιμοποιούνται πιο συχνά είναι τα λεγόμενα διαγράμματα φορείς . Τα δεδομένα που είναι αποθηκευμένα ως διανυσματικά δεδομένα που διαθέτει το ίδιο το διάγραμμα φορέας, μπορούν να παρουσιαστούν σε ένα ευρύ φάσμα κλιμάκων. Οι πληροφορίες από τα διαγράμματα φορείς μπορεί να χρησιμοποιούνται και να ερμηνεύονται στο λογισμικό δρομολόγησης. Σημαντικοί παράγοντες που λαμβάνονται και σαν αρχικές πληροφορίες είναι το βάθος του νερού καθώς και η θέση της στεριάς και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να αποφύγουμε την ξηρά. Έτσι δημιουργείται η καλύτερη διαδρομή η οποία μπορεί να υποβληθεί είτε στο σύστημα δρομολόγησης ή στο σύστημα ECDIS , με αποτέλεσμα να είναι πιο εύκολη η χρήση των πληροφοριών από τους καπετάνιους.

Στην πλοήγηση η λογική του "τέλειου κύκλου" είναι η καλύτερη μέθοδος για την εύρεση της συντομότερης απόστασης μεταξύ δύο σημείων σε μια σφαίρα. Για παράδειγμα, στο αεροπλάνο η ευθεία γραμμή αντιπροσωπεύει την μικρότερη απόσταση μεταξύ δύο σημείων. Ωστόσο, σε μια σφαίρα, ο "τέλειος κύκλος" είναι η μικρότερη απόσταση μεταξύ δύο σημείων, αν και η γη δεν είναι τελείως σφαιρική, αλλά αυτή η μέθοδος είναι κατά προσέγγιση πολύ αποτελεσματική στην διαδικασία της εύρεσης της βέλτιστης διαδρομής. Στην ναυτιλία η προβολή που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής είναι η προβολή Mercator. Η προβολή Mercator είναι μια κυλινδρική προβολή, με την ικανότητα να αντιπροσωπεύουν οι γραμμές της μια σταθερή πορεία, που είναι γνωστή ως γραμμές που ενώνουν ή loxodromes, όπως ευθείες γραμμές με κλίση 90 μοίρες προς τους μεσημβρινούς. Το παρακάτω σχήμα δείχνει το τέλειο κύκλο και τη ευθεία γραμμή που ενώνει δύο σημεία σύμφωνα με την προβολή Mercator.



$$D = \arccos(\sin(\text{lat}_A) \cdot \sin(\text{lat}_B) + \cos(\text{lat}_A) \cdot \cos(\text{lat}_B) \cdot \cos(\text{lon}_B - \text{lon}_A)) \cdot 3440 \text{ nM}$$

### 3.1 Μοντέλο κατανάλωσης καυσίμου

Ένα μοντέλο κατανάλωσης καυσίμου έχει έμμεση σχέση μεταξύ της επιτυγχάνουσας ταχύτητας και της αντίστοιχης κατανάλωσης καυσίμου. Επίσης αρκετοί παράγοντες διαμορφώνουν αυτή την σχέση ταχύτητας – κατανάλωσης. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει κάποιους από αυτούς τους παράγοντες:

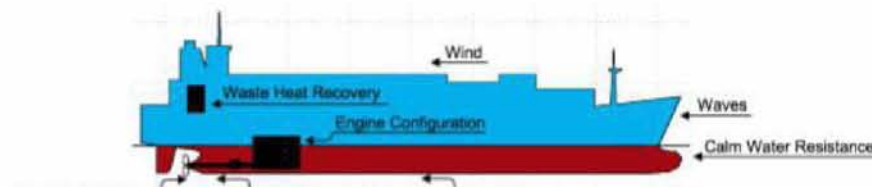


Figure 2.4: Ship fuel factors and components in the fuel consumption model

Ship fuel factors and components in the fuel consumption model.

Η κατασκευή ενός μοντέλου κατανάλωσης καυσίμου μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας τη θεωρία γενικής χρήσης, χρησιμοποιώντας πολύπλοκες μεθόδους, μέσω μετρήσεων και μοντελοποίησης των πλοίων, ή ως και συνδυασμό των δύο παραπάνω παραγόντων. Το επίπεδο της πολυπλοκότητας προσδιορίζεται από την ποσότητα των διαθέσιμων πληροφοριών για το πλοίο. Για να επιτευχθεί ένα καλό μοντέλο κατανάλωσης καυσίμων, οι εκτιμήσεις της κατανάλωσης πρέπει να βασίζονται σε στοιχεία που προκύπτουν από μετρήσεις.

Η κατανάλωση καυσίμου έχει σχέση με την απαιτούμενη παραγωγή ισχύος και την κατανάλωση λιπαντικών λαδιών των κινητήρων. Τα μοντέλα που αφορούν την απόδοση ισχύος καθώς και της κατανάλωσης καυσίμου, παρέχονται από τον κατασκευαστή του κινητήρα και βασίζονται σε εκτεταμένες δοκιμές, αλλά μπορεί να χρειαστεί οι κινητήρες να υποβληθούν σε δοκιμές πλήρους κλίμακας οι οποίες είναι απαραίτητες κατά τις δοκιμές του σκάφους.

### 3.1.1 Αποτελεσματική ισχύς

Η απαίτηση για την παραγωγή ισχύος, ή αποτελεσματικής ισχύος, μπορεί να προσδιοριστεί με βάση τους υπολογισμούς που γίνονται για την αντοχή του πλοίου σε κανονικές συνθήκες και στην συνέχεια να προσθέτουμε αντιστάσεις ανάλογα με την αλλαγή των συνθηκών. Οι αλλαγές θα προστίθενται από την ακόλουθη εξίσωση, η οποία δεν λαμβάνει υπόψη το φορτίο του πλοίου, και σχετίζεται μόνο με την

αντίσταση:  $P_E = R_{total} \cdot V$ .

Η αποδιδόμενη ισχύς μπορεί να υπολογιστεί από την αποτελεσματική ισχύ σύμφωνα με τον τύπο:  $P_D = P_E \cdot \eta_T$ ,

όπου  $\eta_T$ : Συνολική αντίσταση:  $\eta_T = \eta_H \eta_O \eta_R \eta_S$ .

$\eta_H$ : Αποτελεσματικότητα κύτους.

$\eta_O$ : Αποτελεσματικότητα σε ήρεμα νερά.

$\eta_R$ : Σχετική περιστροφική αποδοτικότητα.

$\eta_S$ : Αποτελεσματικότητα μετάδοσης ισχύος.

Οι καινούριες μέθοδοι που προτείνονται για τις εκτιμήσεις αυτές (Kristensen and Lutzen, 2012), και βασίζονται σε προηγούμενες έρευνες, προτρέπουν την ενσωμάτωση όλων αυτών των παραγόντων σε ένα μοντέλο ώστε να απαιτείται λιγότερη γνώση για την διαμόρφωση ενός αποτελέσματος, δηλαδή πληροφορίες – δεδομένα που αφορούν το πλοίο και συνήθως αλλάζουν αρκετά γρήγορα κάνοντας τις δοκιμές δύσκολες να πραγματοποιηθούν.

### 3.1.2 Αντίσταση πλοίου

Για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε την παραγόμενη δύναμη, πρέπει να εκτιμήσουμε την παραγόμενη αντίσταση. Η αντίσταση που δημιουργείται στα πλοία είναι αποτέλεσμα ενός μεγάλο αριθμό παραγόντων. Η αντίσταση προέρχεται τόσο από τα ήρεμα νερά, αλλά υπάρχει και η προστιθέμενη αντίσταση ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν, δηλαδή επηρεάζεται από τα κύματα, καθώς και από τον άνεμο.

Η αντίσταση ενός τυπικού πλοίου που κινείται στη θάλασσα, σύμφωνα με την (Larsson και Raven, 2010), οφείλετε κατά 20% στην δημιουργία κυμάτων καθώς και στο σπάσιμο των κυμάτων. Το υπόλοιπο 80% οφείλεται στην κολλώδη αντίσταση. Σε συνθήκες θαλασσοταραχής η αντίσταση μπορεί να είναι μεγαλύτερη λόγω των μεγαλύτερων κυμάτων και του πιο έντονου ανέμου. Από έρευνες που

έχουν γίνει καταλήγουμε ότι η προστιθέμενη αντίσταση είναι του μεγέθους του 15%–30%.

### 3.1.3 Κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση καυσίμου

Εκτός από τους παράγοντες που αναφέρθηκαν οι οποίοι επηρεάζουν την κατανάλωση καυσίμου υπάρχουν πολλοί ακόμη οι οποίοι θα πρέπει να αναφερθούν. Η ακόλουθη παράγραφος θα ασχοληθεί με ορισμένους από αυτούς.

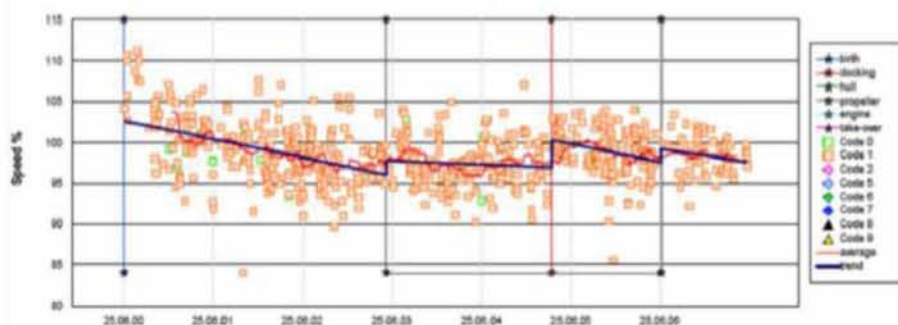
Και οι δύο παράγοντες όπως ο άνεμος και τα ρεύματα από τα κύματα έχουν άμεση επίδραση στην προστιθέμενη αντίσταση, αλλά μια έμμεση επίδραση στην αντίσταση παίζουν οι παράγοντες και οι δυνάμεις που έχουν κάθετες συνιστώσες στο πλοίο. Αυτές προκαλούν τόσο οπισθέλκουσα καθώς και εκτροπή του πλοίου η οποία με τη σειρά της οδηγεί σε προστιθέμενη έλξη και ως εκ τούτου αντίσταση στην καρίνα του πλοίου και στο πηδάλιο, λόγω της κινήσεις του πηδαλίου που απαιτείται για να κρατήσει το πλοίο σε μια επιθυμητή πορεία.

Το *squat effect* είναι το υδροδυναμικό φαινόμενο κατά το οποίο ένα πλοίο που κινείται γρήγορα σε ρηχά νερά, δημιουργεί μια έκταση μειωμένης πίεσης που έχει ως αποτέλεσμα το πλοίο να είναι πιο κοντά στον βυθό της θάλασσας από ό, τι διαφορετικά θα ήταν αναμενόμενο. Αυτό το φαινόμενο προκαλείται όταν το νερό που θα έπρεπε κανονικά να ρέει κάτω από το κύτος συναντά αντίσταση λόγω της στενής εγγύτητας του κύτους προς το βυθό της θάλασσας. Η αρχή Bernoulli προκαλεί το νερό να κινηθεί πιο γρήγορα, δημιουργώντας μια περιοχή χαμηλής πίεσης με χαμηλωμένη επίπεδη επιφάνεια του νερού. Αυτή η επίδραση προέρχεται από το συνδυασμό του κάθετου βυθίσματος του σκάφους και της ισοστάθμισης του και μια αλλαγή σε αυτούς τους παράγοντες μπορεί να προκαλέσει βυθίσει του πλοίου προς την πρύμνη ή προς την πλώρη. Το *Squat effect* είναι περίπου ανάλογο με το τετράγωνο της ταχύτητας του πλοίου. Έτσι, με τη μείωση της ταχύτητας κατά το ήμισυ, η επίδραση μειώνεται κατά ένα συντελεστή τέσσερα. Η επίδραση γίνεται περισσότερο αισθητή συνήθως όταν η αναλογία βάθους / θαλάσσιου ρεύματος είναι λιγότερο από τέσσερα ή όταν το σκάφος πλέει κοντά σε αβαθή νερά. Μπορεί να οδηγήσει σε απροσδόκητες καταστάσεις και σε δυσκολίες χειρισμού. Πιστεύεται ότι ήταν μία από τις αιτίες για την προσάραξη του *Queen Elizabeth 2 (QE2)* στο νησί *Cutttyhunk* στις 7, Αυγ 1992. Είναι επίσης γνωστό ότι ήταν ένας παράγοντας στη σύγκρουση των πλοίων μεταφοράς χύδην φορτίου *Tecam Sea* και *Federal Fuji* στο λιμάνι του Σορέλ, Κεμπέκ, τον Απρίλιο του 2000.

Ως ρύπανση του κύτους του πλοίου ορίζουμε την προσκόλληση θαλάσσιων οργανισμών στην επιφάνεια του κύτους η οποία αυξάνει την τραχύτητα της γάστρας και ως εκ τούτου την αντίσταση μέσα στο νερό. Ο καθαρισμός του κύτους ή η εκ νέου βαφή του πραγματοποιείται έξω από το νερό σε σταθερά χρονικά διαστήματα. Τα προγραμματισμένα αυτά διαστήματα μπορεί να μην είναι τα

βέλτιστα δυνατά με δεδομένο ότι η ταχύτητα με την οποία εμφανίζεται η ρύπανση του κύτους σε ένα συγκεκριμένο πλοίο ποικίλει ανάλογα με τον τύπο βαφής που έχει χρησιμοποιηθεί, τις περιοχές που ταξιδεύει το πλοίο και τον χρόνο που το πλοίο παρέμενε αγκυροβολημένο ή δεμένο στο λιμάνι.

Εκτός από τη ρύπανση της γάστρας, η υποβάθμιση της λειτουργίας της προπέλας επίσης μειώνει την απόδοση πρόωσης. Η μη βέλτιστη λειτουργία της προπέλας οφείλεται στην επιφανειακή τραχύτητα της η οποία δημιουργείται από την προσκόλληση θαλάσσιων οργανισμών στην επιφάνεια της, την διάβρωση και την δημιουργία κοιλοτήτων στην επιφάνεια της καθώς επίσης και από την στρέβλωση των πτερυγίων της λόγω προσκρούσεων . Η μη σωστή συντήρηση της προπέλας, η επικάλυψή της με βαφή του κύτους, η υπερβολική λείανση της και οι τσακισμένες άκρες μπορεί επίσης να μειώσουν την αποτελεσματικότητα της. Αν και η αρνητική επίδραση επί της απόδοσης του πλοίου μιας υποβαθμισμένης προπέλας είναι μικρότερη από μια ρυπασμένη γάστρα, μπορεί να αυξήσει την κατανάλωση καυσίμου κατά περίπου 6-8%. Για να γίνει κατανοητή η επίπτωση της κατάστασης του κύτους και της προπέλας στην κατανάλωση καυσίμου, είναι απαραίτητο να απομονωθούν τα αποτελέσματα σχετικά με την κατανάλωση καυσίμων με βάση τις παραμέτρους που μελετάμε. Αυτό γίνεται κυρίως με τη συλλογή αρχείων κατανάλωσης καυσίμου σε ελεγχόμενες ή επαναλαμβανόμενες συνθήκες. Από τα δεδομένα που συγκεντρώνει αφαιρεί τις επιπτώσεων που έχουν στην κατανάλωση τα ρεύματα της θάλασσας , η ισοστάθμιση του πλοίου, ο άνεμος και τα κύματα, ή τα συγκρίνει με την κατανάλωση του πλοίου σε παρόμοιες συνθήκες σε παλαιότερες δοκιμασίες. Οι πληροφορίες αυτές στη συνέχεια παρουσιάζονται σε ακατέργαστη μορφή, ή χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του drydock κα out-of-service κόστους για την παροχή συμβουλών σχετικά με τον βέλτιστο προγραμματισμό συντήρησης. Είναι πλέον ξεκάθαρο ότι η απώλεια απόδοσης πρόωσης του πλοίου έχει άμεση σχέση με την τραχύτητα λόγω ρύπανσης του κύτους επομένως η εκπόνηση του βέλτιστου προγράμματος καθαρισμού και στίλβωσης του πλοίου έχει μεγάλα οικονομικά οφέλη . Το σχήμα 2.6 δείχνει τις επιδράσεις των ακαθαρσιών σε σχέση με την ταχύτητα.



Τα συστήματα ανάκτησης θερμότητας ή ανάκτησης ενέργειας από τα θερμά καυσαέρια έχουν επίδραση στην κατανάλωση καυσίμων. Αυτή η ενέργεια μπορεί να

χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρισμού ή να επιστραφεί στο σύστημα προώθησης μέσω ενός κινητήριου άξονα αυξάνοντας την ισχύ που παρέχεται προς τον άξονα. Η ανάκτηση θερμότητας από τα απόβλητα είναι εφικτή σε ορισμένες μόνο περιοχές. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μια σημαντική μεταβολή της κατανάλωσης καυσίμου του πλοίου και μπορεί να επιτρέψει την απαλλαγή από τις βοηθητικές γεννήτριες.

Ένας ακόμα παράγοντας που προστίθεται στην πολυπλοκότητα του μοντέλου για τον υπολογισμό των καυσίμων, είναι μια γεννήτρια άξονας, η οποία όταν λειτουργεί μειώνει την ισχύ που παραδίδεται στο σύστημα προώθησης με αποτέλεσμα να αυξάνει την αποδιδόμενη ισχύ της κύριας μηχανής. Η απόφαση για την λειτουργία αυτού του άξονα λαμβάνεται σε ορισμένες περιπτώσεις ανάλογα και με τις καιρικές συνθήκες.

Οι πολλαπλές μηχανές αυξάνουν την πολυπλοκότητα του μοντέλου κατανάλωσης καυσίμων. Με δύο κινητήρες του ίδιου τύπου η διαδικασία υπολογισμού της κατανάλωσης είναι μάλλον απλή, αλλά αυτό δεν ισχύει όταν υπάρχουν πολλές περισσότερες πολύπλοκες εγκαταστάσεις. Για παράδειγμα δύο ζεύγη κινητήρων με την λεγόμενη διάταξη «πατέρας και γιος». Έχοντας ένα πλοίο το οποίο είναι σε θέση να πλεύσει με διάφορους τρόπους λειτουργίας, η ανάλυση πρέπει να πραγματοποιείται με σκοπό να υπολογίσουμε τον πιο αποτελεσματικό τρόπο σε σχέση με την αποδιδόμενη ισχύ. Αυτό με τη σειρά του προσθέτει περισσότερη πολυπλοκότητα στην επιλογή καμπύλης κατανάλωσης καυσίμου, όπου ο αλγόριθμος μπορεί να χρειαστεί να κάνει επιλογή της βέλτιστης καμπύλης ή να κάνει εναλλαγή καμπυλών ανάλογα με τα δεδομένα. Επιπλέον, ακόμα πιο πολύπλοκος γίνεται στις μέρες μας ο υπολογισμός της κατανάλωσης λόγω των κινητήρων διπλού καυσίμου που έχουν εμφανιστεί στην αγορά, αξιοποιώντας διαφορετικά καύσιμα με διαφορετική κατανάλωση και κόστος. Η σωστή συντήρηση έχει άμεση επιρροή στη σχέση μεταξύ της παραγόμενης δύναμης και της κατανάλωσης καυσίμων πετρελαίου. Διαφορετικές επισκευές μηχανημάτων, κυρίως στις κύριες και βοηθητικές μηχανές, έχουν και διαφορετική επίδραση στην σχέση αυτή.

Συνοψίζοντας, με βάση τα στοιχεία ενός πλοίου είναι δυνατόν να δημιουργήσουμε ένα εκτεταμένο μοντέλο σχετικά με την ταχύτητα του πλοίου σε σχέση με την κατανάλωση καυσίμου, λαμβάνοντας υπόψη μετρήσεις που δεν συμπεριλαμβάνονται στους υπολογισμούς για τις αντιστάσεις του νερού. Όταν δεν έχουν πραγματοποιηθεί εκτεταμένες δοκιμές ή δεν είναι διαθέσιμες τέτοιες μετρήσεις, μπορεί να απαιτείται ένα τέτοιο μοντέλο υπολογισμού ταχύτητας – κατανάλωσης καυσίμου, ακόμη και αν βασίζεται σε κατά προσέγγιση εξισώσεις. Αυτό, βέβαια, έχει ως αποτέλεσμα, η υπολογισμένη κατανάλωση καυσίμου για μια πλήρη διαδρομή να μην ανταποκρίνονται πλήρως στην πραγματική κατανάλωση.

### 3.1.4 Αντίσταση σε ήρεμα νερά

Υπάρχουν αρκετές θεωρητικές μέθοδοι για τον υπολογισμό της αντίστασης του πλοίου όταν επικρατούν φυσιολογικές συνθήκες στο νερό της θάλασσας, όπως η μέθοδος ITTC-57 καθώς και οι θεωρίες του Holtrop and Mennen. Όταν οι πληροφορίες και τα δεδομένα που έχουμε από το πλοίο είναι περιορισμένες η μέθοδος ITTC-57 είναι προτιμότερη από την βελτιωμένη μέθοδο που πρότειναν οι Kristensen and Lutzen, 2012, η οποία λαμβάνει υπόψη την επίδραση από τα βολβώδη τόξα (bulbous bows) που βρίσκονται μπροστά στην καρίνα, τα οποία είναι υπεύθυνα στο να βελτιώνουν την ροή του νερού κάτω από το πλοίο. Όμως όταν έχουμε περισσότερα δεδομένα από το πλοίο η προτιμότερη μέθοδος είναι αυτή που είχαν προτείνει οι (Holtrop and Mennen, 1978).

### 3.1.5 Αντίσταση που οφείλετε στα κύματα

Η προστιθέμενη αντίσταση που προκαλείται από τα κύματα μπορεί να μοντελοποιηθεί μέσω εκτεταμένων δοκιμών ή με μια θεωρία που αναφέρεται στον προσδιορισμό ανυψώσεως του σκάφους από τη θάλασσα με βάση την οποία μπορούμε να υπολογίσουμε την προστιθέμενη αντίσταση. Μια τρίτη επιλογή δεν απαιτεί γνώση των γραμμών του σκάφους και έτσι καθιστά εφικτή, μια πιο γενική μέθοδο για τη συγκέντρωση της προστιθέμενης αντίστασης, αν και η ακρίβεια μπορεί να περιορίζεται σε σύγκριση με τις αναφερθείσες μεθόδους, λόγω της δυσκολίας της μοντελοποίησης της φύσης των κυμάτων. Μία τέτοια μέθοδος περιγράφεται στο (Kwon, 2008), και συνοψίζεται στα ακόλουθα τμήματα. Αυτή η μέθοδος λαμβάνει υπόψη τόσο τα κύματα όσο και τον άνεμο ταυτόχρονα.

### 3.1.6 Αντίσταση που οφείλεται στον άνεμο

Ο άνεμος προκαλεί μικρότερη αντίσταση, η οποία είναι εξίσου σημαντική με την αντίσταση που οφείλεται στα κύματα. Η επίδραση της αντίστασης από τον άνεμο είναι ιδιαίτερα σημαντική για τα μεγαλύτερα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και κρουαζιέρας.

Έναν απλό τρόπο για τον υπολογισμό της αντίστασης από τον άνεμο, είχε προτείνει ο (Holtrop, 1988), και τον είχε παρουσιάσει στο ITTC-78 ως:  $R_{air} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\alpha} \cdot V_{2s} \cdot A_T C_{air}$

$R_{air}$ : Είναι η δύναμη αντίστασης, η οποία είναι από ορισμού η συνιστώσα της δύναμης προς την κατεύθυνση της ταχύτητας.

$\rho_{\alpha}$ : η πυκνότητα της μάζας του αέρα.

$V$ : η ταχύτητα του πλοίου σε σχέση με τον άνεμο.

$A_T$  η περιοχή αναφοράς.

$C_{air}$  : Είναι ο συντελεστής αντίστασης, δηλαδή είναι ο συντελεστής που σχετίζεται με τη γεωμετρία του πλοίου και λαμβάνει υπόψη τόσο την τριβή της επιφάνειας του σκάφους αλλά και τη μορφή του πλοίου.

Όμως, υπάρχει και μια πιο εξελιγμένη μέθοδος που προτείνει ο (Fujiwara et al., 2006). Η μέθοδος βασίζεται σε δοκιμές που γίνονται στην αεροδυναμική σήραγγα καθώς επίσης περιλαμβάνει και δοκιμές ρυμούλκησης και αποτελεί μια εξέλιξη της μεθόδου που είχε πρότεινε πέντε χρόνια νωρίτερα ο (Fujiwara et al., 2001). Στο (Kristensen και Lützen, 2012) προτείνεται μια πιο εκτενή λίστα της αντίστασης του αέρα, ως διόρθωση, με τη μέθοδο ITTC-57.

Στο (Andersen, 2013), η κατεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου έχει μελετηθεί για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (cargo ships). Εδώ παρουσιάζεται ότι η τοποθέτηση των container, που χρησιμοποιούνται για τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων παίζει σημαντικό ρόλο στην προστιθέμενη αντίσταση του αέρα και κατά συνέπεια οδηγεί σε ένα επιπρόσθετο επίπεδο πολυπλοκότητας στους υπολογισμούς αν ληφθεί υπόψη.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τον Andersen, 2013 θα προσπαθήσουμε να τα συνοψίσουμε εδώ:

- Αλλαγές στην τοποθέτηση των container στο κατάστρωμα έχουν μεγάλη επίδραση στο μέγεθος της αντίστασης κατά μήκος του καταστρώματος .
- Μια τυχαία τοποθέτηση των container μπορεί να αυξήσει την αντίσταση σημαντικά. Μεγάλες παρατυπίες, όπως πολλές κενές θέσεις μπορεί να αυξήσει την διαμήκη αντίσταση κατά 70-100%, σε σύγκριση με το πλήρως φορτωμένο πλοίο σε σχετικό άνεμο από 0°.
- Εξορθολογισμός της τοποθέτησης των container στο μπροστινό μέρος του καταστρώματος έχει μικρή επιρροή στην διαμήκους αντίσταση.

Η μελέτη παρουσιάζει ορισμένες εξισώσεις για τον υπολογισμό της αντίστασης του ανέμου για τις διάφορες περιπτώσεις φόρτωσης των container, αλλά δεν θα συζητηθεί περαιτέρω εδώ.

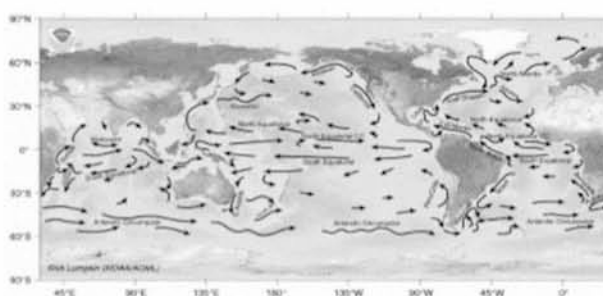
Όσο για τα κύματα, η επιρροή του ανέμου τόσο από τις κατευθύνσεις όσο και από τις ταχύτητες διαφέρουν και μπορούν να μελετηθούν περισσότερο μέσω δοκιμών. Συγκεκριμένα, μέσα από δοκιμές στην αεροδυναμική σήραγγα. Τα αποτελέσματα μπορούν στη συνέχεια να επεκταθούν και να μοντελοποιηθούν.



### 3.2 Επίδραση από τα ωκεάνια ρεύματα

Οι επιδράσεις των ρευμάτων, μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να επηρεάσουν την ταχύτητα του πλοίου, δηλαδή να αυξήσουν ή να μειώσουν τη μέση ταχύτητα του πλοίου. Για παράδειγμα κατά μήκος των ακτών της Ιαπωνίας, μπορεί να υπάρχει αύξηση δύο κόμβων στην ταχύτητα του πλοίου (Chang et al., 2013). Η εξέταση των ρευμάτων, τόσο παγκόσμιας κλίμακας ρευμάτων κυκλοφορίας όσο και παλιρροιακών ρευμάτων, παρουσιάζουν ενδιαφέρον για τη δρομολόγηση του σκάφους.

Το παρακάτω σχήμα δείχνει μια γενική επισκόπηση των παγκόσμιων κλίμακας ρευμάτων κυκλοφορίας.



**Figure 2.5:** Overview of global surface currents courtesy of U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration

Τα παλιρροιακά ρεύματα προκαλούνται από τη βαρυτική επίδραση του φεγγαριού, του ήλιου και της περιστροφής της γης. Είναι ειδικά ρεύματα, λόγω του τρόπου που αλλάζουν κατεύθυνση κατά τη διάρκεια της ημέρας. Σε κάποιες περιοχές υπάρχει υψηλή παλίρροια δύο φορές την ημέρα και σε ορισμένες μόνο μία φορά. Τα ρεύματα που δημιουργούνται από παλιρροιακές δυνάμεις διαφέρουν αισθητά σε όλη την υδρόγειο. Σε Pentland Firth, μεταξύ της Σκωτίας και της νήσου Orkney το ρεύμα μπορεί να υπερβαίνει τους 10 κόμβους σε ορισμένα τμήματα της ευθείας. Αυτό καταδεικνύει επίσης την ανάγκη για εφαρμογή των ρευμάτων σε ένα εργαλείο δρομολόγησης.

Οι επιδράσεις των κυμάτων, μπορούν να ληφθούν υπόψη στο μοντέλο υπολογισμού της κατανάλωσης καυσίμου μέσω της αλλαγής ισχύος που απαιτείται να παραχθεί από τον κινητήρα, έτσι ώστε να παραμείνει σταθερή η ταχύτητα του πλοίου. Για παράδειγμα, αν ένα πλοίο θέλει να κινηθεί με ταχύτητα 2 κόμβων, τότε ο κινητήρας θα πρέπει να δώσει μεγαλύτερη δύναμη έτσι ώστε να έχουμε την επιθυμητή ταχύτητα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Αυτός ο τρόπος λαμβάνει υπόψη μόνο την συνιστώσα του ρεύματος που υπάρχει δίχως να υπολογίζει και τις απώλειες που υπάρχουν από το drift που δημιουργούνται από τον κινητήρα.

### 3.2.1 Γενικά- Εκτίμηση πιθανότητας κατανομής της ταχύτητας ανέμου

Για τις ανάγκες εκτίμησης της επίδρασης των καιρικών συνθηκών στην απόδοση του πλοίου και κατ' επέκταση στο χρόνο διαδρομής από το σημείο προέλευσης έως το σημείο προορισμού, απαιτείται ο προσδιορισμός ενός συνόλου ανεμολογικών παραμέτρων.

Βασικές τέτοιες παράμετροι αποτελούν η μέση ταχύτητα καθώς και η διεύθυνση των ανέμων.

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

Όπως είναι εύλογο, προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι ανεμολογικές συνθήκες στην εύρεση της βέλτιστης διαδρομής ενός πλοίου είναι απαραίτητη η μεθοδολογία εκτίμησης των χρόνων διαδρομής, που αποτελεί ένα από τα προβλήματα στην διαδικασία του weather routing. Η αποτύπωση της μεταβολής των παραπάνω παραμέτρων και συνάμα η συνεπαγόμενη μεταβολή της ταχύτητας λειτουργίας του πλοίου. Σε αυτό το πλαίσιο, απαιτούνται μακροχρόνια ανεμολογικά στοιχεία ολόκληρης της περιοχής του δικτύου, τα οποία χρειάζεται να γίνουν αντικείμενο στατιστικής επεξεργασίας ώστε να εξαχθεί η συνδυαστική κατανομή της πιθανότητας εμφάνισης των διαφόρων τιμών της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου μέσα στο χρόνο.

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

### 3.2.2 Άνεμοι και πρόκληση κυματισμών

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

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

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

### 3.2.3 Απομείωση ταχύτητας πλοίου λόγω κυματισμών

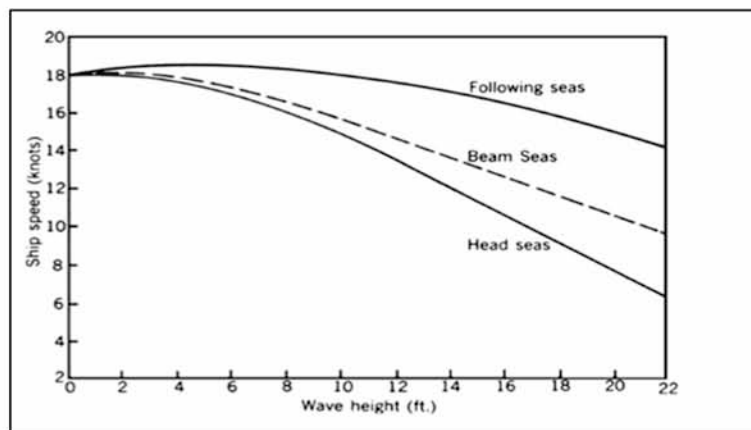
Κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού στη θάλασσα η ταχύτητα ενός πλοίου μπορεί να μειωθεί. Η μείωση αυτή μπορεί να είναι εκούσια (voluntary speed loss) ή ακούσια (involuntary speed loss). Η ακούσια μείωση της ταχύτητας οφείλεται στην πρόσθετη αντίσταση λόγω κυματισμού, ανέμου και μείωσης της διατιθέμενης ισχύς της κυρίας μηχανής λόγω των κινήσεων του πλοίου και του αυξημένου φορτίου στην έλικα. Η ηθελημένη μείωση της ταχύτητας γίνεται μετά από εντολή του καπετάνιου όταν φαινόμενα όπως η διαβροχή του καταστρώματος (deck wetness), η σφυρόκρουση πλώρας (bow slamming) καθώς και άλλα θέτουν σε κίνδυνο τόσο τους επιβάτες και το πλήρωμα όσο και το φορτίο και την ίδια τη βιωσιμότητα του πλοίου.

Για τα περισσότερα εμπορικά πλοία η αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς τους έγκειται στην ικανότητα διατήρησης της ταχύτητας κανονικής λειτουργίας σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Η διατήρηση αυτής της ταχύτητας συνεπάγεται την ασφάλη και έγκαιρη μεταφορά του πληρώματος και του φορτίου, για προκαθορισμένο δρομολόγιο. Ο καπετάνιος προκειμένου να διασφαλίσει το πλοίο και την αποστολή του προβαίνει σε ηθελημένη μείωση της ταχύτητας όταν οι αποκρίσεις του πλοίου σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες υπερβαίνουν κάποια όρια. Τέτοια όρια αφορούν κυρίως στο χρόνο που λαμβάνει χώρα η διαβροχή του καταστρώματος καθώς και η σφυρόκρουση (Sen & Padhy, 2010).

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

seas) για εκτεταμένο χρονικό διάστημα. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι καμπύλες απόδοσης πλοίου (speed performance curves), οι οποίες χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ταχύτητας του εκάστοτε πλοίου, ανάλογα με τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, υποδηλώνουν την επίδραση όλων των παραπάνω περιπτώσεων ανεμολογικής κατάστασης στην τελική ταχύτητα του πλοίου, σε συσχετισμό με διάφορες τιμές του ύψους κύματος. Βέβαια, κάθε πλοίο διαθέτει διαφορετική καμπύλη απόδοσης, η οποία εξαρτάται από τον τύπο της καρίνας του πλοίου, το μήκος του, το σχήμα του, την ισχύ του καθώς και τη χωρητικότητά του (tonnage).

Το διάγραμμα παρουσιάζει την καμπύλη ταχύτητας εμπορικού πλοίου με ταχύτητα λειτουργίας 18 κόμβων για να έχουμε μια πρώτη εικόνα από ότι εξηγήσαμε στα παραπάνω:



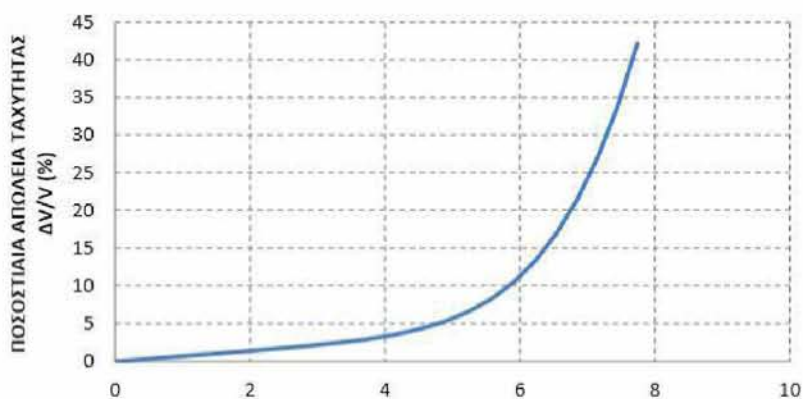
Αναζητήσαμε για να βρούμε τον μαθηματικό τύπο που θα μπορούσε να μας δώσει κάποια αποτελέσματα για την επίδραση του ανέμου στην ταχύτητα του πλοίου. Για αυτό το λόγο θα χρησιμοποιηθεί μία ημι εμπειρική σχέση, η οποία μπορεί να αποδώσει τη μείωση ταχύτητας του πλοίου λόγω συνδυασμένης δράσης κυμάτων και ανέμων με προσεγγιστική ακρίβεια. Μία τέτοια εξίσωση διατυπώθηκε από τους Townsin & Kwon (Kwon, 1981), για διάφορους τύπους πλοίων.

Σύμφωνα με τους Townsin & Kwon, η συγκεκριμένη εξίσωση παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά στην εκτίμηση της ακούσιας μείωσης ταχύτητας πλοίου (involuntary speed loss), χρησιμοποιούμενη κυρίως για πρακτικούς σκοπούς. Βασίζεται στον υπολογισμό της συνολικής πρόσθετης αντίστασης και της απαιτούμενης αύξησης της ισχύος λόγω των κυμάτων, ανάλογα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πλοίου.

Η μείωση της ταχύτητας, όπως εκφράζεται από το λόγο, αφορά στη δυσμενέστερη περίπτωση διεύθυνσης του ανέμου, δηλαδή αντίρροπα της κατεύθυνσης του πλοίου

(head seas). Η παραδοχή της αντίρροπης διεύθυνσης του ανέμου ισχύει και για το υπό εξέταση δίκτυο δρομολόγησης, ώστε η πρόβλεψη των χρόνων διαδρομής να εντάσσεται στο δυσμενέστερο, από ανεμολογικής άποψης, πλαίσιο.

**Διάγραμμα μείωσης ταχύτητας – Ένταση ανέμου.**



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

Σε αυτό το πεδίο, υπερτερεί η εκούσια απώλεια που, όπως σημειώθηκε, είναι δύσκολο να καθοριστεί εκ των προτέρων το ύψος της, δεδομένων των ιδιαιτεροτήτων της κάθε περίπτωσης.

### 3.2.4 Εκτίμηση πιθανοτικής κατανομής για τους χρόνους διαδρομής

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

$$t_{i,j} = \frac{D_{i,j}}{V_{i,j}},$$
 όπου,  $i$  είναι ο κόμβος προέλευσης,  $j$  ο κόμβος προορισμού, ο χρόνος

διαδρομής μεταξύ  $i,j$ , η απόσταση μεταξύ των  $i,j$ , η ταχύτητα λειτουργίας του πλοίου στη διαδρομή  $i,j$ .

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

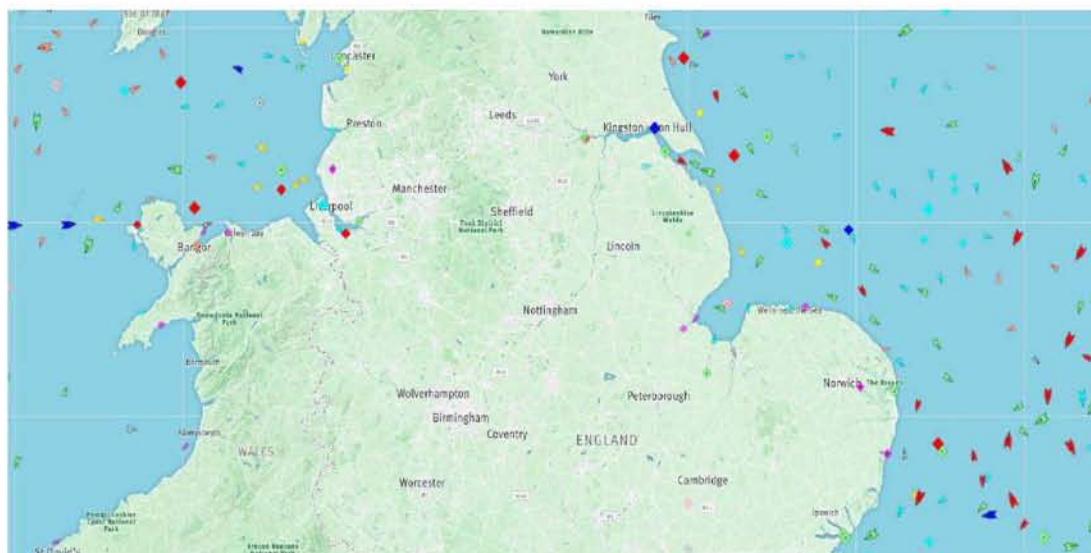


### 3.3 Γεωγραφική αποτύπωση της διαδρομής

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

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

Ας παρατηρήσουμε ένα παράδειγμα για το πώς είναι το συγκεκριμένο λογισμικό:



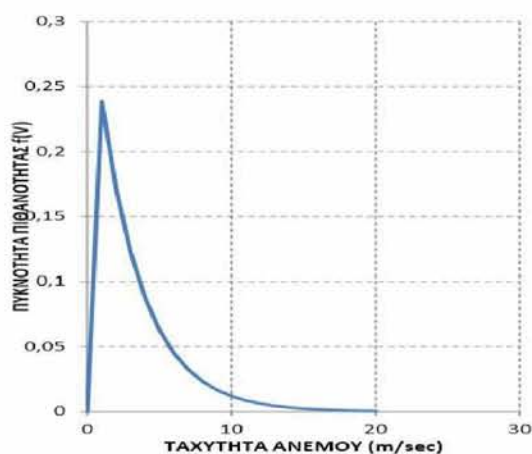


### 3.4 Υπολογισμός κατανομής πυκνότητας-πιθανότητας ταχύτητας ανέμου για κάθε επιμέρους τμήμα της διαδρομής

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

Κατά αυτόν τον τρόπο, διαμορφώνεται για κάθε επιμέρους τμήμα η κατανομή πυκνότητας-πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου.

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



Σχήμα 5.8 Κατανομή ταχύτητας ανέμου για τη ζώνη 2.5

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

#### 3.4.1 Εκτίμηση συνολικής κατανομής της ταχύτητας του ανέμου για το ζεύγος προέλευσης – προορισμού

Μετά τον υπολογισμό της κατανομής πυκνότητας-πιθανότητας για κάθε επιμέρους τμήμα της διαδρομής μεταξύ προέλευσης-προορισμού, απαιτείται ο προσδιορισμός της γενικής κατανομής του ανέμου ανά διαδρομή. Ο προσδιορισμός αυτός επιτυγχάνεται συνεκτιμώντας τα προφίλ των επιμέρους τμημάτων καθώς και το ποσοστό συμμετοχής του κάθε τμήματος στη διαδρομή μεταξύ του ζεύγους των κόμβων. Το ποσοστό συμβολής κάθε τμήματος πολλαπλασιάζεται με την πιθανότητα εμφάνισης  $f(V)$  (Στήλη 3 του προηγούμενου πίνακα) και τα επιμέρους

γινόμενα συνιστούν τη γενική κατανομή του ανέμου για τη θαλάσσια σύνδεση του υπό εξέταση ζεύγους κόμβων. Η νέα  $f'(V)$  δηλαδή προκύπτει ως γραμμικός συνδυασμός των επιμέρους  $f(V)$  με τα αντίστοιχα ποσοστά συμμετοχής:  $f'(V) = \alpha_1 \cdot f_1(V) + \alpha_2 \cdot f_2(V) + \dots + \alpha_n \cdot f_n(V)$ .

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

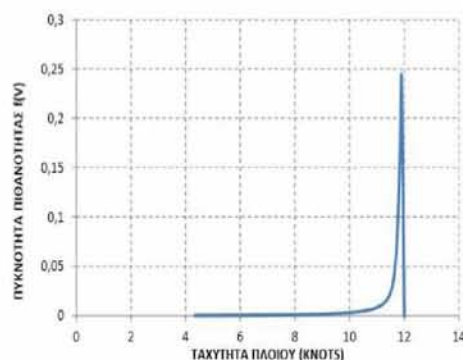
### 3.4.2 Προσδιορισμός της απώλειας ταχύτητας και εκτίμηση της συνολικής κατανομής ταχύτητας πλοίου

Δεδομένου ότι έχει προσδιοριστεί η κατανομή που ακολουθεί η ταχύτητα του ανέμου στη διαδρομή μεταξύ δύο λιμένων, σε αυτό το επίπεδο πραγματοποιείται η μετάβαση από την κατανομή του ανέμου στην κατανομή της ταχύτητας του πλοίου. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, η επίδραση του ανέμου στην ταχύτητα του πλοίου είναι μια δυναμική διαδικασία, η οποία στα πλαίσια αυτής της εργασίας περιγράφεται από τη προσεγγιστική σχέση των Townsin & Kwon (1983). Επομένως, για τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα στάδια της διαδικασίας, υπολογίζεται η ποσοστιαία απώλεια ταχύτητας. Θέτοντας μία αρχική τιμή ταχύτητας λειτουργίας του πλοίου, η οποία εξαρτάται αμιγώς από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πλοίου αναφοράς, υπολογίζεται η τελική ταχύτητα του πλοίου για κάθε ενδεχόμενο έντασης του ανέμου.

Καθώς υπεισέρχεται και η κατανομή πυκνότητας-πιθανότητας του ανέμου εύκολα προσδιορίζεται και η συνολική κατανομή της ταχύτητας του πλοίου. Στο ίδιο μοτίβο με το προηγούμενο παράδειγμα, κατά την εφαρμογή της διαδικασίας για ένα ζεύγος προέλευσης-προορισμού προστίθενται οι στήλες 5,6,7. Το παράδειγμα αφορά τη σύνδεση μεταξύ δύο κόμβων προέλευσης-προορισμού, με παραδοχή αρχικής ταχύτητας λειτουργίας πλοίου, τους 12 κόμβους/ώρα:

Πίνακας 5.7 Πιθανότητα εμφάνισης διαφόρων τιμών ταχύτητας πλοίου

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



Σχήμα 5.9 Σχηματική μορφή πιθανοτικής κατανομής ταχύτητας πλοίου

Η Στήλη 5 παρουσιάζει την αρχική ταχύτητα λειτουργίας του πλοίου (που αντιστοιχεί για ένταση ανέμου 0 Beaufort), η Στήλη 6 παρουσιάζει την απώλεια ταχύτητας όπως αυτή υπολογίστηκε από τον υιοθετούμενη προσεγγιστική σχέση και η Στήλη 7 την τελική ταχύτητα του πλοίου για κάθε πιθανότητα εμφάνισης.

#### 4. Βελτιστοποίηση και προηγούμενες έρευνες

Η βελτιστοποίηση είναι ένα πεδίο των εφαρμοσμένων μαθηματικών που χρησιμοποιεί μαθηματικά μοντέλα για να καθοριστεί η καλύτερη δυνατή λύση σε ένα πρόβλημα, Lundgren et al. (2010). Στην βελτιστοποίηση, ο στόχος είναι να βρούμε την καλύτερη λύση ή την καλύτερη δυνατή λύση. Αν η καλύτερη λύση δεν είναι δυνατό να ικανοποιεί μια σειρά από κριτήρια, η καλύτερη δυνατή λύση θεωρείται και η καλύτερη. Τρεις παράμετροι είναι σημαντικοί στη βελτιστοποίηση: η αντικειμενική συνάρτηση, οι μεταβλητές απόφασης και οι περιορισμοί. Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η συνάρτηση που ελαχιστοποιείται ή μεγιστοποιείται ώστε να βρούμε τη βέλτιστη λύση,  $\max f(X)$ . Η αντικειμενική συνάρτηση περιλαμβάνει μία ή περισσότερες μεταβλητές απόφασης, το  $X$ , το οποίο μεταβάλλεται, προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη λύση. Η αντικειμενική συνάρτηση συνήθως υποβάλλεται σε μια σειρά περιορισμών. Οι περιορισμοί ορίζουν την εφικτή περιοχή της συνάρτησης, και περιορίζουν την τιμή του  $X$ .

Η βελτιστοποίηση έχει πολλές εφαρμογές. Σε αυτές συμπεριλαμβάνονται ο προγραμματισμός της παραγωγής, οι μεταφορές και τα logistics, ο σχεδιασμός και ο προγραμματισμός προγραμμάτων. Σε αυτή την διατριβή θα παρουσιάσουμε την δρομολόγηση ως μέρος της βελτιστοποίησης. Ο Christiansen et al. (2007) ορίζει τρεις τομείς όπου η βελτιστοποίηση χρησιμοποιείται εντός της ναυτιλίας. Στον στρατηγικό σχεδιασμό, όπου είναι ο μακροπρόθεσμος προγραμματισμός ενός πλοίου ή ενός στόλου, με χρονικό ορίζοντα αρκετών ετών. Αυτός περιλαμβάνει το σχεδιασμό του πλοίου, το είδος του πλοίου και του φορτίου του, το σχεδιασμό του δικτύου και το μέγεθος του στόλου. Στον τακτικό σχεδιασμό, ο οποίος έχει μικρότερο χρονικό ορίζοντα και συνήθως εκτείνεται σε λίγους μήνες. Αυτός περιλαμβάνει την ανάπτυξη του στόλου, την δρομολόγηση των πλοίων και τον προγραμματισμό, τη διαχείριση των πλοίων και την διακίνηση φορτίων. Τέλος στον επιχειρησιακό σχεδιασμό, ο οποίος σχεδιάζει τις επόμενες ημέρες ή ένα ταξίδι. Αυτός περιλαμβάνει την ταχύτητα πλεύσης, την διαδικασία φόρτωσης του πλοίου και το Weather Routing.

Υπάρχουν τρεις μέθοδοι που χρησιμοποιούνται κυρίως στο Weather routing. Αυτές οι μέθοδοι θα παρουσιαστούν εν συντομία εδώ.

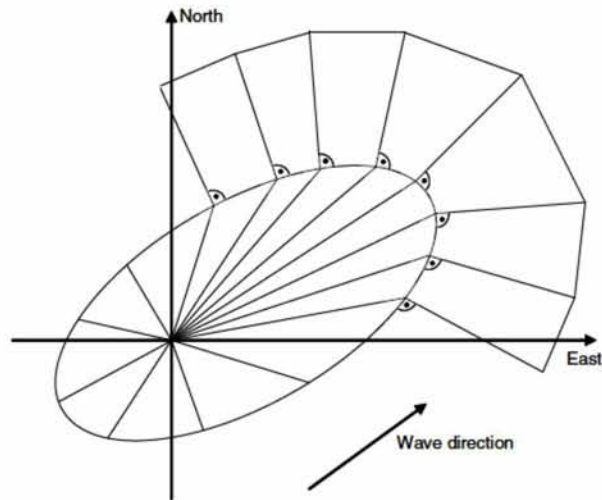
#### 4.1 Τροποποιημένη μέθοδος Isochrone

Η μέθοδος Isochrone είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται συχνά στα λογισμικά Weather Routing. Η μέθοδος αυτή προτάθηκε αρχικά από τον James (1957). Ο Hagiwara (1989) τροποποίησε την μέθοδο και η μέθοδος είναι τυπικά γνωστή ως τροποποιημένη μέθοδος isochrone. Παρουσίασε μια μέθοδο με τρεις διαφορετικές εφαρμογές: την ελαχιστοποίηση του χρόνου, των καυσίμων ή του κόστους. Η αντικειμενική συνάρτηση που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί για τον ελάχιστο χρόνο δρομολόγησης με την τροποποιημένη μέθοδος Isochrone είναι:

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

Όπου  $A(X, U, t)$  είναι η μεταβλητή απόφασης, αντιπροσωπεύει την ώρα που έχει ταξιδέψει το πλοίο, το  $X$  είναι η θέση του πλοίου και το  $U$  είναι το διάνυσμα ελέγχου το οποίο συμπεριλαμβάνει την πορεία του πλοίου και τον αριθμό περιστροφών του έλικα. Η  $B(t_f, t_s)$  είναι μια μεταβλητή ποινής, και είναι μεγαλύτερη από μηδέν, εάν το σκάφος φτάσει στον προορισμό του μετά από την προγραμματισμένη ώρα άφιξης. Το  $t_0$  είναι η στιγμή της αναχώρησης, το  $t_s$  είναι η προγραμματισμένη ώρα άφιξης και το  $t_f$  είναι η πραγματική ώρα άφιξης. Η μεταβλητή απόφασης για την ελάχιστη κατανάλωση καυσίμων είναι  $F$ , και  $C$  για το ελάχιστο κόστος. Και αυτές εξαρτώνται από τις ίδιες παραμέτρους όπως και η  $A$ . Η ποινή καθυστέρησης ποικίλλει για τις τρεις διαφορετικές αντικειμενικές συναρτήσεις. Για την δρομολόγηση με την ελάχιστη κατανάλωση καυσίμων ισχύει ότι  $B(t_f, t_s) = \infty$  για  $t_f > t_s$ , και για την δρομολόγηση με το ελάχιστο κόστος έχουμε ότι  $B(t_f, t_s) = w(t_f - t_s)^2$  για  $t_f > t_s$  όπου  $w$  είναι μια επιλεγμένη σταθερά.

Ως ισόχρονη ορίζεται μια γραμμή σε ένα χάρτη ή ένα διάγραμμα που συνδέει διάφορα μέρη στα οποία παίρνει τον ίδιο χρόνο για να ταξιδέψει ένα πλοίο. Η μέθοδος isochrone λειτουργεί με τον εξής τρόπο: Οι ισόχρονες γραμμές σχεδιάζονται με ένα δεδομένο χρονικό όριο από το σημείο αναχώρησης. Οι ισόχρονες γραμμές έχουν διαφορετικό φυσικό μήκος, σε ναυτικά μίλια, λόγω της διακύμανσης των αντιστάσεων στους διάφορους τομείς του πλοίου. Η ισχύς του κινητήρα διατηρείται σταθερή και η ταχύτητα μεταβάλλεται με την αντίσταση. Νέες ισόχρονες γραμμές σχεδιάζονται στα τελικά σημεία των προηγούμενων ισόχρονων. Οι ισόχρονες γραμμές σχεδιάζονται με ίδιο τρόπο μέχρι να φτάσουμε στον προορισμό του πλοίου. Όταν η πρώτη ισόχρονη γραμμή συναντά το σημείο προορισμού, η βέλτιστη διαδρομή έχει βρεθεί. Ένα παράδειγμα κατασκευής ισόχρονων γραμμών φαίνεται στην εικ. 4.1.



Εικόνα 4.1 Κατασκευή ισόχρονων γραμμών σύμφωνα με τους Szlarczyńska και Smierzchalski (2007)

#### 4.2 Υπολογισμός των μεταβολών

Η μέθοδος υπολογισμού των μεταβολών προτάθηκε αρχικά από τον Haltiner et al. (1962). Οι Παπαδάκης και Περάκης (1990) ανέπτυξαν την μέθοδο περαιτέρω, και ήταν σε θέση να βρουν την διαδρομή και τις ρυθμίσεις ισχύος του σκάφους. Οι Περάκης και Παπαδάκης (1989) επέκτειναν επίσης την μέθοδο ώστε να είναι έγκυρη σε ένα χρονικά, εξαρτώμενο περιβάλλον.

Ο υπολογισμός των μεταβολών είναι μια αναλυτική προσέγγιση για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής με βάση τις καιρικές συνθήκες. Θεωρεί την πορεία και την έξοδο ισχύος του κινητήρα του πλοίου ως μεταβλητές απόφασης.

Η αντικειμενική συνάρτηση σε αυτή τη μέθοδο διαμορφώνεται ως εξής:

$$J = \int_{x_0}^{x_f} \frac{1}{V} (1 + y_x^2)^{\frac{1}{2}} dx \quad (4.2)$$

Όταν το σημείο εκκίνησης ορίζεται ως  $(x_0, y_0)$  και το τελικό σημείο ορίζεται ως  $(x_f, y_f)$  και

$$V = [P(H) + Q(H) \cos(u - \Phi)] R(p) \quad (4.3)$$

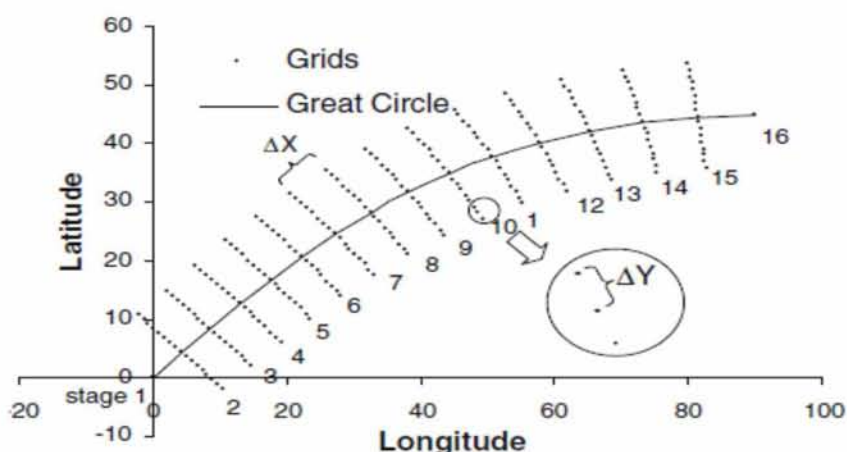
Όπου  $V$  είναι η ταχύτητα του πλοίου, το  $H$  δηλώνει το ύψος του σημαντικού κύματος, το  $\Phi$  είναι η κατεύθυνση του κύματος και  $u$  είναι η πορεία του. Τα  $P$  και  $Q$  είναι θετικές συναρτήσεις του  $H$  και το  $R$  είναι μία θετικά αυξανόμενη συνάρτηση

των ρυθμίσεων ισχύος. Σε αντίθεση με την τροποποιημένη μέθοδο *isochrone*, αυτή η μέθοδος επιτρέπει μεταβολές στην ισχύ του κινητήρα. Η κατεύθυνση των κυμάτων και το ύψος των κυμάτων είναι γνωστές συναρτήσεις των  $x$  και  $y$ . Ο στόχος είναι να βρούμε την κατάλληλη διαδρομή,  $y_x$ , η οποία ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση  $J$ .

Η μέθοδος υπολογισμού των μεταβολών θεωρεί το πρόβλημα δρομολόγησης των πλοίων ως ένα συνεχές πρόβλημα βελτιστοποίησης. Όταν για την επίλυση του προβλήματος δρομολόγησης χρησιμοποιούμε αυτή την μέθοδο, η πρώτη διαδρομή είναι τυχαία. Η βέλτιστη διαδρομή βρίσκεται προσαρμόζοντας την πορεία και τις ρυθμίσεις ισχύος. Αυτό γίνεται με μια σειρά από περιορισμούς, έτσι ώστε η βέλτιστη διαδρομή να είναι ρεαλιστική. Υπάρχουν δύο τρόποι για να βρούμε τη λύση: είτε με την εξίσωση Euler Hamiltonian, ή με ένα σύνολο γραμμικών εξισώσεων.

### 4.3 Δυναμικός προγραμματισμός

Δυναμικός προγραμματισμός είναι μια στρατηγική βελτιστοποίησης όπου η κύρια ιδέα είναι να διαιρέσει το πρόβλημα σε πολλά υπό προβλήματα που μπορούν να λυθούν ανεξάρτητα. Το πρόβλημα χωρίζεται σε στάδια, όπου βρίσκεται η βέλτιστη λύση για έναν αριθμό υπό προβλημάτων, Lundgren et al. (2010). Μία κατάσταση στο δυναμικό προγραμματισμό ορίζεται η πιθανή λύση ενός σταδίου, για παράδειγμα η θέση του πλοίου. Κατά τη χρήση του δυναμικού προγραμματισμού στο Weather Routing, προκαθορίζουμε ένα πλέγμα. Το πλέγμα αποτελείται από γεωγραφικά σημεία που καθορίζουν τις καταστάσεις και τα στάδια. Κάθε σημείο στο πλέγμα περιέχει πληροφορίες σχετικά με τα κύματα και τον άνεμο. Η παρακάτω εικόνα δείχνει ένα τυπικό σχεδιασμό του δικτύου, όπου τα στάδια αποτελούνται από ένα σύνολο σημείων, αριθμημένα από 1 έως και 16, και οι καταστάσεις είναι τα σημεία σε κάθε στάδιο.



Σχήμα 4.2 .: Σχεδίαση πλέγματος όπως ορίζεται από τον Zhao et al. (2012)

Ο Shao et al. (2012) ορίζει ως υπό πρόβλημα τον υπολογισμό της κατανάλωσης καυσίμου μεταξύ δύο σταδίων. Η βέλτιστη κατανάλωση καυσίμου βρίσκεται αθροίζοντας τα καύσιμα που καταναλώνονται μεταξύ των σταδίων έως την ολοκλήρωση της διαδρομής. Προκειμένου να καθοριστεί η βέλτιστη λύση, χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος προς τα εμπρός. Όταν χρησιμοποιείτε έναν αλγόριθμο προς τα εμπρός, ως βέλτιστη λύση ορίζεται η εξής: Μια διαδρομή είναι η βέλτιστη εάν και μόνο εάν, για οποιονδήποτε ενδιάμεσο στάδιο, η επιλογή της προηγούμενης διαδρομής ήταν η βέλτιστη για το στάδιο αυτό, Lundgren et al.(2010). Αυτό σημαίνει ότι κατά την αξιολόγηση του κόστους για μια κατάσταση στο 3 στάδιο, θα πρέπει να αξιολογηθεί το συνολικό κόστος από το 1 στάδιο και όχι μόνο από το 2 στάδιο. Η αντικειμενική συνάρτηση στο δυναμικό προγραμματισμό είναι:

$$f_t(s_t) = \min_{x_t} [c_t(s_t, x_t) + \sum_{i=t-1}^T c_i(s_i, x_i)] = \min_{x_t} [c_t(s_t, x_t) + f_{t-1}(s_{t-1})] \quad (4.4)$$

Όπου το  $t$  ορίζει το στάδιο και η  $f_t$  είναι η αντικειμενική συνάρτηση για το δεδομένο στάδιο.  $s_t$  είναι η κατάσταση, δηλαδή το σημείο από το οποίο ξεκινάμε στο  $t$ .  $x_t$  είναι η μεταβλητή απόφασης, το σημείο στο οποίο ταξιδέψαμε στο στάδιο  $t$ , και  $c_t(s_t, x_t)$  είναι το κόστος, ή στην δική μας περίπτωση, η κατανάλωση καυσίμου μεταξύ των σημείων  $s_t$  και  $x_t$ .

Ένας αλγόριθμος προς τα εμπρός είναι περίπλοκος, και δεν θα παρουσιαστεί εδώ. Σε αυτή τη διατριβή θα χρησιμοποιήσουμε έναν συντομότερο αλγόριθμο για να βρούμε την διαδρομή με την ελάχιστη κατανάλωση καυσίμων, η μέθοδος αυτή είναι παρόμοια με τη δυναμική μέθοδο προγραμματισμού, αλλά ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται είναι διαφορετικός.

## 5. Υδροδυναμική πλοίων και στατιστικά κυμάτων

Προκειμένου να προσδιοριστεί η βέλτιστη διαδρομή μεταξύ δύο λιμένων θα πρέπει να γνωρίζουμε την αντίσταση και την απόδοση του σκάφους. Όταν ένα σκάφος είναι εκτεθειμένο στα κύματα και τον άνεμο η αντίσταση θα ποικίλει, και το σκάφος θα υποστεί μετακινήσεις και επιταχύνσεις. Η αντίσταση που δέχεται το πλοίο ορίζεται ως η αντίσταση ήρεμων νερών στην οποία προστίθεται η αντίσταση λόγω κυμάτων και η αντίσταση λόγω του ανέμου. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το σκάφος που χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση του προβλήματος εύρεσης της βέλτιστης διαδρομής με βάση τις καιρικές συνθήκες. Περιγράφεται η θεωρία πίσω από τον υπολογισμό της αντίστασης που δέχεται ένα πλοίο, των αποκρίσεων ενός πλοίου και των υπολογισμών πρόωσης. Επίσης παρουσιάζονται και μερικά αποτελέσματα υπολογισμών του ShipX.

Το ShipX είναι ένα λογισμικό που αναπτύχθηκε από την MARINTEK και χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό και την ανάλυση ενός πλοίου. Το πρόγραμμα έχει πολλά plug-ins και μπορεί να εκτελέσει διαφορετικούς υπολογισμούς σε σχέση με το seakeeping, την αντίσταση, την προστιθέμενη αντίσταση, την τήρηση ενός σταθμού και πολλά άλλα. Το ShipX χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της προστιθέμενης αντίστασης και τις λειτουργίες απόκριση του σκάφους. Αυτά τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται αργότερα στο πρόγραμμα για να προσδιοριστεί η βέλτιστη διαδρομή.

### 5.1 Παρουσίαση του πλοίου που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση

Το πλοίο που χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση είναι ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, 3500 TEU. Ως βάση των δεδομένων που απαιτούνται παίρνουμε μία δοκιμή-μοντέλο που πραγματοποίησε η MARINTEK το 1995. Λόγω εμπιστευτικότητας της δοκιμής-μοντέλο, οι λεπτομέρειες τις δοκιμής δεν θα παρουσιαστούν παρά μόνο οι γενικές διαστάσεις του πλοίου και τα κυριότερα αποτελέσματα σε σχέση με την αντίσταση της πρόωσης.

Οι γενικές διαστάσεις του πλοίου παρουσιάζεται στην καρτέλα. 5.1.

ΟΝΟΜΑ	ΣΥΜΒΟΛΟ	ΜΟΝΑΔΑ	ΤΙΜΗ
Length on waterline	$L_{WL}$	m	226.27
Length per perpendiculars	$L_{PP}$	m	233.00
Breath molded	B	m	32.20
Breath waterline	$B_{WL}$	m	32.20
Draft	T	m	11.00
Volume displacement	V	m <sup>3</sup>	47202.48
Prismatic coefficient	$C_P$	-	0.602
Block coefficient	$C_B$	-	0.584
Midship coefficient	$C_M$	-	0.971



Longitudinal center of buoyancy	LCB	m	-6.78
Wetted surface	S	m <sup>2</sup>	8973.03

Πίνακας 5.1 Γενικές διαστάσεις του πλοίου.

Το μοντέλο δοκιμάστηκε και για 11 αλλά και 12.5 m ρεύμα. Η προκαθορισμένη τιμή του ρεύματος ήταν τα 11 m και ως εκ τούτου, όλοι οι υπολογισμοί εκτελούνται με αυτήν την τιμή.

ΟΝΟΜΑ	ΣΥΜΒΟΛΟ	ΜΟΝΑΔΑ	ΤΙΜΗ
Propeller diameter	D	m	7.5
Pitch ratio at 0.7R	P/D	-	0.9482
Number of blades	Z	-	5
Blade area ratio	$A_E / A_0$	-	0.75
Cord length	c	m	2.617
Thickness	t	m	0.0906
Mechanical efficiency	$\eta_M$	-	0.98
Brake power	$P_B$	kW	28710
Brake specific fuel consumption	BSFC	g/kWh	166

Πίνακας 5.2 Βασικά δεδομένα πρόωσης του πλοίου.

Η δύναμη πέδησης είναι η εκτιμώμενη ισχύ μετά τη δοκιμή-μοντέλο, και η κατανάλωση καυσίμου για το συγκεκριμένη πέδηση, BSFC, επιλέγει μετά από αξιολόγηση μηχανών με την επιθυμητή ισχύ, WärtsilaEngines (2013).

Το αποτέλεσμα από τη δοκιμή-μοντέλο όσον αφορά την ταχύτητα πλεύσης και τις στροφές του έλικα ανά λεπτό (RPM) είναι:

$$V = 23,78 \text{ Kn και RPM} = 114,7 \text{ [rev / min]}$$

## 5.2 Αντίσταση ήρεμων νερών

Στη ναυπηγική βιομηχανία η μελέτη της αντίστασης του σκάφους σε ήρεμα νερά χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί η απόδοση του συστήματος πρόωσης, ακόμη και αν το πλοίο σπάνια λειτουργεί σε ήρεμα νερά. Ο Lee et al. (1985) αναφέρει ότι η πιθανότητα ήρεμων νερών στο Βόρειο Ατλαντικό είναι 0.7 τοις εκατό, ενώ η πιθανότητα ήρεμων νερών στο Βόρειο Ειρηνικό 1.3 τοις εκατό. Έχοντας αυτό υπόψη, μπορεί να φαίνεται περίεργο το γεγονός ότι η απόδοση του πλοίου σε ήρεμα νερά είναι ο στόχος για τους περισσότερους για την βελτιστοποίηση του κύτους και της πρόωσης. Ωστόσο, αυτό οφείλεται στο ότι η σύμβαση που υπογράφει ο πλοιοκτήτης με το ναυπηγείο περιλαμβάνει και ρήτρα σχετικά με την επιθυμητή βέλτιστη ταχύτητα πλεύσης. Η βέλτιστη ταχύτητα πλεύσης καθορίζεται σε ήρεμα νερά, γιατί σε διαφορετική κατάσταση της θάλασσας είναι δύσκολο να προσδιοριστεί.

Για να προσδιοριστούν οι αντιστάσεις του πλοίου σε ήρεμα νερά πραγματοποιείται μια δοκιμή ρυμούλκησης. Στόχος της δοκιμής ρυμούλκησης είναι να προσδιοριστεί ένας σταθερός συντελεστής για την στατική αντίσταση του πλοίου ώστε να χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό της συνολικής αντίστασης του πλοίου.

Η αντίσταση προσδιορίζεται χωρίς την χρήση διαστάσεων του πλοίου χρησιμοποιώντας αυτόν τον τύπο:

$$C = \frac{R}{1/2\rho SV^2} \quad (5.1)$$

Όπου R είναι η αντίσταση, ρ είναι η πυκνότητα του νερού, το S είναι η βρεχόμενη επιφάνεια του κύτους και V είναι η ταχύτητα του σκάφους.

Η συνολική αντίσταση του πλοίου είναι το άθροισμα των διαφόρων συνιστωσών αντίστασης. Ο Steen (2007) ορίζει την συνολική αντίσταση ως:

$$C_T = C_R + C_V + C_{AA} + C_{BD} + C_A \quad (5.2)$$

Όπου  $C_R$  είναι ο υπολειπόμενος συντελεστής αντίστασης,  $C_V$  είναι ο συντελεστής αντίστασης του ξώδους,  $C_{AA}$  είναι ο συντελεστής αντίστασης του αέρα,  $C_{BD}$  είναι ο συντελεστής αντίστασης της οπισθέλκουσας της βάσης και  $C_A$  είναι ο συντελεστής συσχέτισης της αντίστασης. Ο υπολειπόμενος συντελεστής αντίστασης στο μοντέλο κλίμακα θεωρείται ότι είναι ίσος με τον υπολειπόμενο συντελεστή αντίστασης σε πλήρη κλίμακα. Αυτός ο συντελεστής μπορεί να βρεθεί από το μοντέλο-δοκιμή χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο:

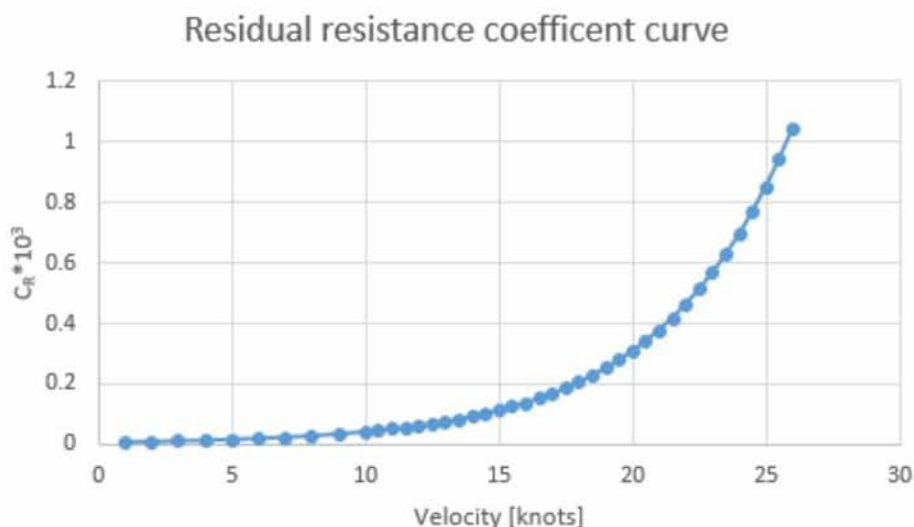
$$C_{RM} = C_{TM} - (1 + k) \cdot C_F - C_{AAM} - C_{BDM} \quad (5.3)$$

Όπου k είναι ο συντελεστής μορφής του πλοίου. Ο συντελεστής μορφής ευθύνεται για την αύξηση της αντίστασης λόγω τριβής με την αύξηση της ταχύτητας του νερού γύρω από το κύτος. Η συνολική αντίσταση είναι η μετρούμενη αντίσταση.

Η δοκιμή ρυμούλκησης που χρησιμοποιείται σε αυτήν την ανάλυση πραγματοποιήθηκε για ταχύτητες μεταξύ 20 και 26 κόμβους. Σε αυτή την εργασία, υποθέτουμε ότι η ταχύτητα του πλοίου μπορεί να είναι μικρότερη των 20 κόμβων όταν το σκάφος είναι εκτεθειμένο σε τρικυμία. Η καμπύλη αντίστασης, ως εκ τούτου, πρέπει να επεκταθεί και σε χαμηλότερες ταχύτητες. Αυτό γίνεται δίνοντας

μια εκτιμώμενη τιμή στον υπολειπόμενο συντελεστή αντίστασης ώστε να υπολογίσουμε τους συντελεστές αντίστασης που απομένουν.

Οι τιμές για το  $C_R$  συλλέγονται από τα αποτελέσματα των δοκιμών, και ο τύπος της εκθετικής παλινδρόμησης  $C_R = 0.0052e^{0.2039V}$  χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της καμπύλης της απομένουσας αντίστασης.



Σχήμα 5.3.1 Καμπύλη υπολειπόμενου συντελεστή αντίστασης

Ο συντελεστής αντίστασης της οπισθέλκουσας της βάσης, ο συντελεστής αντίστασης του αέρα και ο συντελεστής συσχέτισης της αντίστασης μπορεί να υποτεθεί ότι δεν μεταβάλλονται με την ταχύτητα. Η αντίστασης της οπισθέλκουσας της βάσης είναι η αντίσταση που προκαλείται από την βύθιση της πρύμνης. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι ένας συντελεστής διόρθωσης all inclusive που λαμβάνει υπόψη λάθη που προκύπτουν λόγω της μοντελοποίησης. Ο συντελεστής μορφής του πλοίου και οι τρεις συντελεστές που αναφέρθηκαν παραπάνω έχουν υπολογιστεί στη δοκιμή-μοντέλο, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα στην προέκταση της καμπύλης της αντίστασης.

Ο συντελεστής αντίστασης του ιξώδους σε πλήρη κλίμακα υπολογίζεται ως εξής:

$$C_{VS} = (1 + k)(C_{FS} + \Delta C_F) \quad (5.4)$$

Το πρότυπο ITTC για τον υπολογισμό του συντελεστή αντίστασης τριβής είναι:

$$C_F = \frac{0.075}{(\log R_n - 2)^2} \quad (5.6)$$

Όπου  $R_n$  είναι ο αριθμός Reynolds.

$$R_n = \frac{V \cdot L_{WL}}{\nu}$$

(5.7)

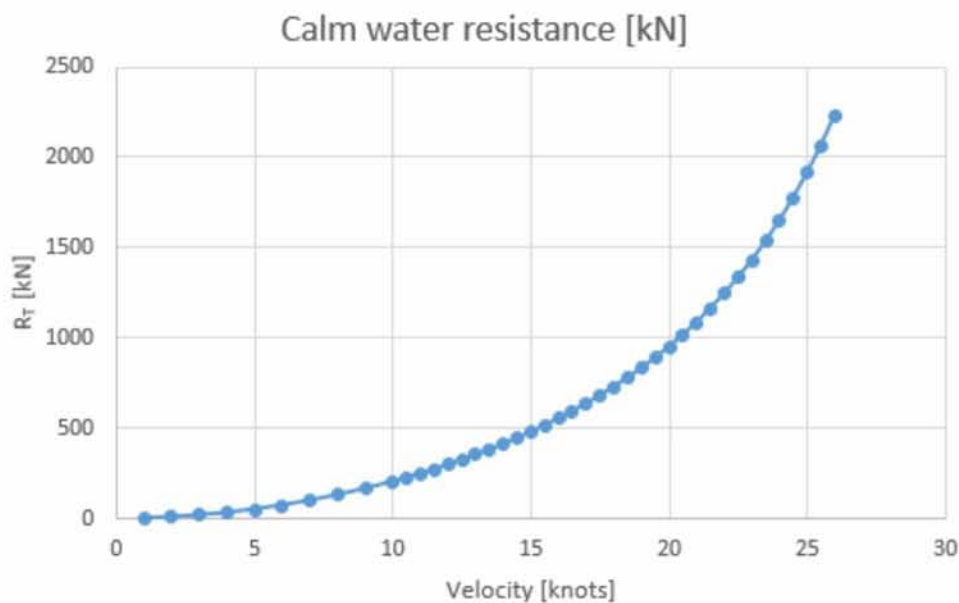
$\nu$  είναι το κινηματικό ιξώδες. Το  $\Delta C_F$  είναι:

$$\Delta C_F = (110.31(H \cdot V)^{0.21} - 403.33)C_F^2$$

(5.8)

Όπου  $H$  είναι η επιφανειακή τραχύτητα του κύτους. Μια τυπική τιμή για αυτό είναι  $150\mu$  ( $10^{-3}\text{mm}$ ).

Για να υπολογίσουμε την ολική αντίσταση όλοι οι συντελεστές μπορούν να εισαχθούν στην εξίσωση 5.2, και να υπολογιστούν εκ νέου σε Newton χρησιμοποιώντας την εξίσωση 5.1.



Σχήμα 5.3.2 Εκτίμηση της καμπύλης αντίστασης

### 5.3 Πρόωση

Για να βρούμε τη δύναμη πέδησης απαιτείται να υπολογίσουμε τους παράγοντες της πρόωσης. Μία δοκιμή ανοικτών νερών, είναι όταν η έλικα δοκιμάζεται σε μια σήραγγα ή σε μια δεξαμενή ρυμούλκησης χωρίς την επιρροή του σκάφους. Μια δοκιμή ανοικτών νερών εκτελείται με σκοπό να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά της προπέλας. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής πραγματοποιούνται μετρήσεις σχετικά με την ροπή  $Q$ , την ώθηση  $T$ , τον ρυθμό των περιστροφών  $n$ , και της ταχύτητα πρόωσης  $V_A$ , Steen και Minsaas (2013).

Η απόδοση της έλικας σε ήρεμα νερά υπολογίζεται από την εξίσωση 2.8.

$$n_0 = \frac{K_T}{K_Q} \cdot \frac{J}{2\pi} \quad (5.8)$$

Όπου ο συντελεστής ροπής είναι:

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (5.9)$$

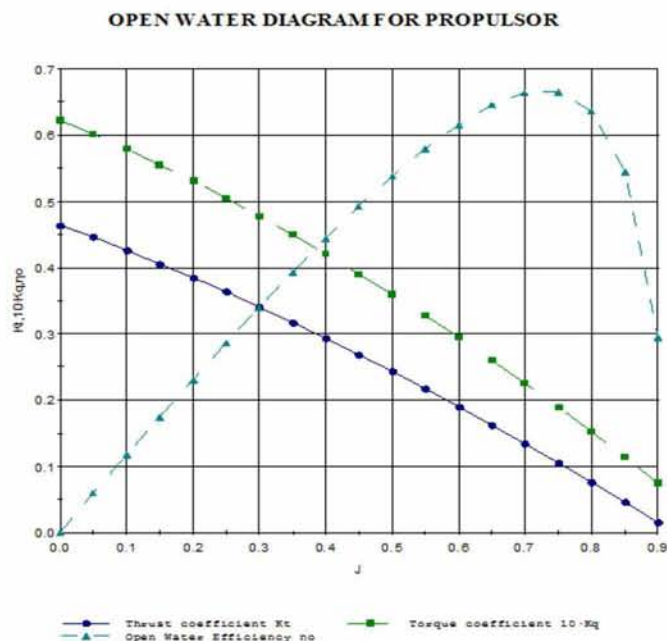
και ο συντελεστής ώθησης είναι:

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (5.10)$$

$D$  είναι η διάμετρος της έλικας. Ο συντελεστής πρόωσης υπολογίζεται ως εξής:

$$J = \frac{V_A}{n \cdot D} \quad (5.11)$$

Τα αποτελέσματα από την δοκιμή μοντέλο της MARINTEK παρουσιάζονται στο σχ. 5.3. Για ένα δεδομένο συντελεστή προώθησης μπορούμε να υπολογίσουμε την ώθηση και τη ροπή και να καθορίσουμε την αποδοτικότητα της προπέλας.



Σχήμα 5.3.3 Δοκιμή ανοικτών νερών

Σε μια δοκιμή ανοικτών νερών η ταχύτητα  $V_A$  είναι ίση με  $V$ . Ωστόσο, όταν η προπέλα εγκαθίσταται πίσω από το κύτος, η γάστρα θα επηρεάσει την ταχύτητα του νερού που ρέει γύρω από τον έλικα. Η ταχύτητα προώθησης επηρεάζεται και από τα απόνερα.

$$V_A = V(1 - \omega)$$

(5.12)

Όπου  $V$  είναι η ταχύτητα του πλοίου και το  $\omega$  είναι το αποτέλεσμα των απόνερων. Μια δοκιμή πρόωσης πραγματοποιείται με σκοπό να καθοριστεί ο βαθμός που τα απόνερα επηρεάζουν την ταχύτητα, την μείωση της ώθησης  $t$ , και του σημείου πρόωσης πλήρους κλίμακας  $J^*$ . Η αποτελεσματικότητα της προπέλας σε πλήρη κλίμακας βρίσκεται από τον καθορισμό του σημείου πρόωσης πλήρους κλίμακας. Το σημείο  $J^*$  καθορίζεται από την εύρεση του σημείου τομής μεταξύ  $K_T$  και  $J^2$ . Ο λόγος μεταξύ του  $K_T$  και  $J^2$  δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\frac{K_T}{J^2} = \frac{R_{TS}}{\rho s \cdot (1 - t) \cdot D^2 V_s^2 \cdot (1 - \omega_s)^2}$$

(5.13)

Ο ρυθμός περιστροφών της προπέλας υπολογίζεται ως εξής:

$$n = \frac{(1 - \omega) \cdot V_s}{D \cdot J^*}$$

(5.14)

Από την δοκιμή πρόωσης η αποτελεσματικότητα του κύτους  $n_H$ , και η σχετική περιστροφική αποδοτικότητα  $n_R$  μπορούν να βρεθούν ως εξής:

$$n_H = \frac{1 - t}{1 - \omega}$$

(5.15)

$$n_R = \frac{Q_0}{Q}$$

(5.16)

Όπου το  $Q$  είναι η ροπή της έλικας από τη δοκιμή ανοικτών νερών, και  $Q_0$  είναι η ροπή του έλικα πίσω από το σκάφος. Οι συντελεστές  $n_H$  και  $n_R$  εξαρτώνται από την ταχύτητα, αλλά η μεταβολή τους λόγω της αλλαγής ταχύτητας είναι μικρή. Όταν το πλοίο έχει χαμηλή διακύμανση της ταχύτητας οι συντελεστές  $n_H$  και  $n_R$ , συχνά, θεωρούνται σταθεροί. Οι Nakamura και Naito (1975) αναφέρουν ότι η συντελεστές δεν επηρεάζονται σημαντικά από τα κύματα, οπότε δεν χρειάζεται να εξετάσουμε την επίδραση των κυμάτων κατά τον υπολογισμό των συντελεστών.

Η δύναμη πέδησης  $P_B$ , για το σκάφος μπορεί τώρα να υπολογιστεί με τις ακόλουθες εξισώσεις

$$P_B = \frac{P_D}{n_M}$$

(5.17)

$$P_D = \frac{P_E}{n_D}$$

(5.18)

$$P_E = R_T \cdot V$$

(5.19)

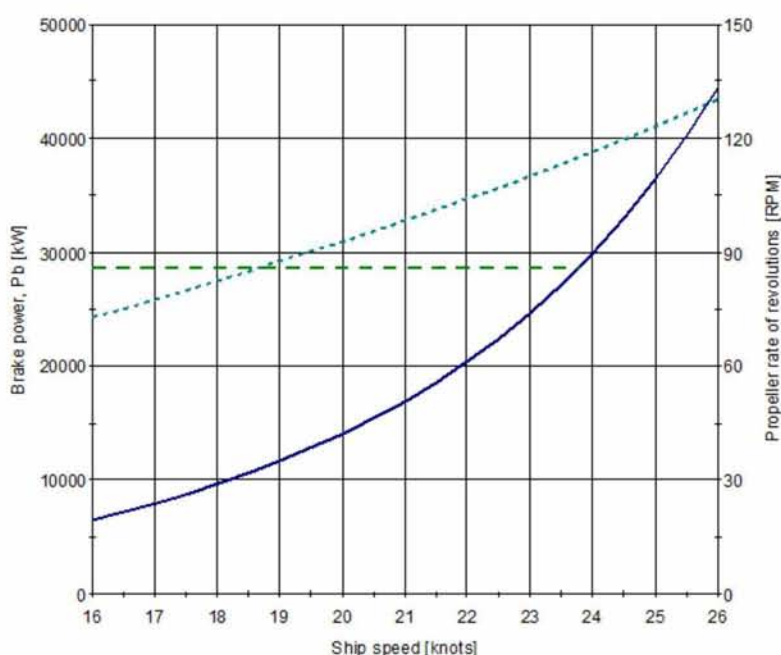
$$n_D = n_H \cdot n_0 \cdot n_R$$

(5.20)

$P_D$  είναι η δύναμη πρόωσης,  $n_M$  είναι η μηχανική απόδοση,  $n_D$  είναι η προωθητική αποδοτικότητα και της  $P_E$  είναι η αποτελεσματική ισχύς.

Η δοκιμή μοντέλο παρέχει όλες τις σχετικές πληροφορίες, προκειμένου να υπολογιστεί η ισχύς που απαιτείται για την πέδηση τόσο για ήρεμα νερά αλλά και την απαιτούμενη ισχύ για μια δεδομένη κατάσταση της θάλασσας. Συνδυάζοντας τους υπολογισμούς της αντίστασης και της πρόωσης το ShipX εκδίδει την ακόλουθη πρόβλεψη των επιδόσεων για ήρεμα νερά:

**Vs = 23.80 knots**  
**Pb = 28709 kW**  
**RPM = 115.0**



Εικόνα 5.3.4 Πρόβλεψη απόδοσης σε ήρεμα νερά.

Μπορούμε να δούμε ότι με ισχύ πέδησης 28.709 kW η ταχύτητα πλεύσης υπολογίζεται στους 23,8 κόμβους και οι RPM της προπέλας είναι 115. Τα αποτελέσματα από το ShipX συμφωνούν με τα αποτελέσματα από τη δοκιμή μοντέλο.



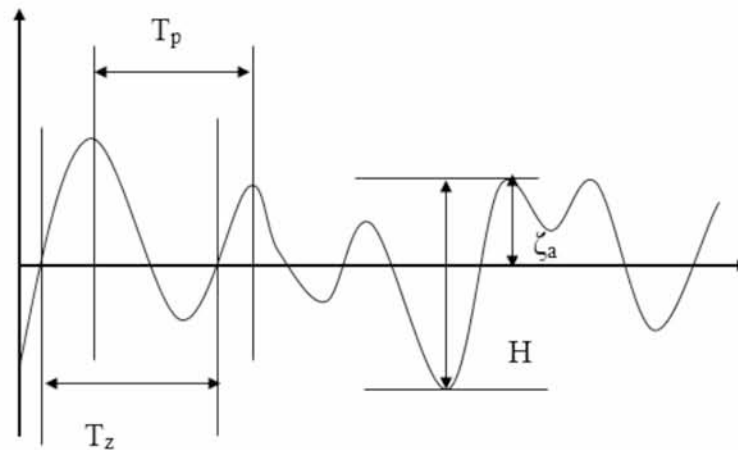
Σε αυτή την εργασία, υποθέτουμε ότι το σκάφος πλέει με μια σταθερή ισχύ πέδησης, έτσι ώστε ο κύριος στόχος είναι να βρεθεί η εφικτή ταχύτητα για μια δεδομένη κατάσταση της θάλασσας. Η ισχύ πέδησης έχει οριστεί ως σταθερή για πρακτικούς σκοπούς. Ο κινητήρας είναι σχεδιασμένος ώστε να παρέχει σε συγκεκριμένο φορτίο την βέλτιστη ισχύ, όταν ο κινητήρας λειτουργεί σε αυτό το σημείο παρουσιάζει πιο οικονομική κατανάλωση καυσίμου και λιγότερες ζημιές. Επίσης, είναι πιο εύκολο να διατηρήσουμε σταθερή την παραγόμενη ισχύ του κινητήρα από ό,τι να ρυθμίζουμε την ισχύ του ώστε να διατηρήσουμε σταθερή την ταχύτητα του πλοίου. Η αποδοτικότητα του κινητήρα και η συνολική αντίσταση του πλοίου, συμπεριλαμβανομένων της αντίστασης ήρεμων νερών, του ανέμου και της αντίστασης από τα κύματα, εξαρτώνται από την ταχύτητα του σκάφους. Εύρεση της βέλτιστης ταχύτητας είναι μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία όπου η συνολική αντίσταση, η ταχύτητα και η αποδοτικότητα υπολογίζονται μέχρι να βρεθεί η ακριβής ισχύ πέδησης.

#### 5.4. Στατιστική μοντελοποίηση των κυμάτων

Για να ερευνήσει την κίνηση και τις αντιστάσεις που επιδρούν σε ένα πλοίο θα πρέπει να μελετήσουμε τα ακανόνιστα κύματα. Τα κύματα παράγονται όταν σταθερός άνεμος φυσάει πάνω από μια περιοχή. Η χρονική περίοδος που φυσάει άνεμος αναφέρεται ως διάρκεια, ενώ η περιοχή όπου φυσάει ο άνεμος αναφέρεται ως φέρων. Ένα ενιαίο κύμα αποτελείται κυρίως από το κύματος που παράγεται από το ρεύμα του ανέμου και το φούσκωμα της θάλασσας. Ως φούσκωμα της θάλασσας ορίζουμε τα κύματα που παράγονται από τον άνεμο μακριά από τη συγκεκριμένη θαλάσσια περιοχή. Στο τμήμα αυτό δεν θα περιγράψουμε την δημιουργία των κυμάτων και του ανέμου, αλλά τις ιδιότητες και τις εφαρμογές της θεωρίας των ακανόνιστων κυμάτων. Η θεωρία σε αυτό το τμήμα αλλά και στο τμήμα 2.5 έχει κυρίως παρουσιαστεί από τους Lloyd (1998) και Faltinsen (1990).

Μια πρόβλεψη κύματος συνήθως περιλαμβάνει το σημαντικό ύψος του κύματος  $H_S$ , την κύρια περίοδο του κύματος  $T_1$  και την μέση κατεύθυνση των κυμάτων.

Ένα τυπικό προφίλ ανύψωσης ακανόνιστου κύματος φαίνεται στο σχ. 5.5.



Σχήμα 5.5 Προφίλ ακανόνιστου κύματος.

Μια εξήγηση των διαφόρων παραμέτρων του κύματος δίνονται στον πίνακα. 5.3.

Σύμβολο	Ορισμός	Επεξήγηση
$T$	Περίοδος κύματος	Χρονική περίοδος σε δευτερόλεπτα μεταξύ κυμάτων
$T_1$	Μέση περίοδος κύματος	Μέση περίοδος μεταξύ ακανόνιστων κυμάτων
$\bar{T}_p$	Μέση περίοδο αιχμής	Μέσος χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών
$T_p$	Περίοδος αιχμής	Περίοδος αιχμής του φάσματος του κύματος
$T_z$	Περίοδος μηδενικού επιπέδου	Περίοδος μεταξύ κυμάτων με μηδενικό υψόμετρο
$\omega$	Συχνότητα κυμάτων	Συχνότητα κυμάτων σε $rad / s \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$
$\omega_p$	Συχνότητα κορυφής	Συχνότητα κορυφής του φάσματος του κύματος
$\zeta$	Ανύψωση κύματος	Ανύψωση κύματος για μία δεδομένη συχνότητα κυμάτων
$\zeta_a$	Εύρος κύματος	Ένα εύρος κύματος
$H$	Ύψος κύματος	Ύψος κύματος σε μέτρα $H = 2\zeta_a$
$H_s$	Σημαντικό ύψος κύματος	Μέσο ύψος των 1/3 υψηλότερων κυμάτων
$H_{1/3}$	Εκτίμηση σημαντικού ύψους κύματος	Εκτίμηση του σημαντικού ύψους κύματος $H_s$ μετρώντας τα ύψη των κυμάτων
$\beta$	Κατεύθυνση κύματος	Κατεύθυνση σε μοίρες, $0^\circ$ είναι μετωπική κατεύθυνση

Πίνακας 5.3 Παράμετροι κύματος

Με αυτές τις παραμέτρους μπορεί να μοντελοποιηθεί η κατάσταση της θάλασσας, να υπολογισθεί η μέση προστιθέμενη αντίσταση καθώς και οι αντιστάσεις που επιδρούν το σκάφος.

### 5.5 Ενεργειακό φάσμα των κυμάτων

Ως ανύψωση ενός κύματος σε ακανόνιστη θάλασσα μπορεί να οριστεί το σύνολο των τακτικών κυμάτων τα οποία διαδίδεται κατά μήκος του θετικού άξονα  $x$ .

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^N \zeta_{An} \cos(\omega_n t + \varepsilon_n) \quad (5.21)$$

Όπου το  $t$  αντιπροσωπεύει το χρόνο και  $\varepsilon$  είναι η γωνία φάσης για ένα δεδομένο κύμα. Η κατάσταση της θάλασσας μπορεί να περιγραφεί είτε από ένα φάσμα κύματος,  $S(\omega)$ , είτε από το πλάτος της φασματικής ενεργειακής πυκνότητας του κύματος. Το φάσμα περιγράφει την κατανομή συχνότητας του κύματος για μια δεδομένη κατάσταση της θάλασσας. Η φασματική τεταγμένη ορίζεται ως:

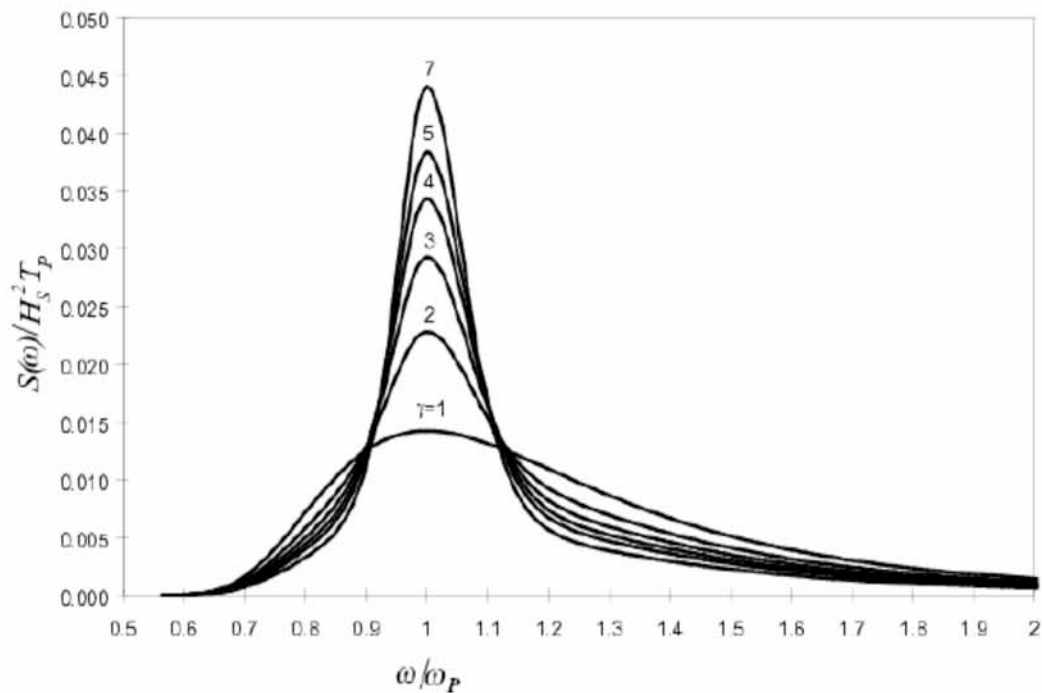
$$S(\omega) = \frac{\zeta_A^2}{2\Delta\omega} \quad (5.22)$$

Έχουν αναπτυχθεί αρκετοί διαφορετικοί τρόποι τυποποιήσεις του φάσματος του κύματος.

Το φάσμα JONSWAP (Joint North Sea Wave Project), αναπτύχθηκε ως ένα πολυεθνικό πρόγραμμα παρατηρώντας την κατάσταση της θάλασσας στο νοτιοανατολικό τμήμα της βόρειας θάλασσας, Myrhaug (2007). Το φάσμα JONSWAP είναι ένα φάσμα δύο παραμέτρων, το οποίο σημαίνει ότι, προκειμένου να τυποποιηθεί θα πρέπει να γνωρίζουμε το φάσμα της περιόδου αιχμής και του σημαντικού ύψους του κύματος. Το φάσμα JONSWAP δεν αντιπροσωπεύει την πλήρως ανεπτυγμένη θάλασσα. Ως πλήρως ανεπτυγμένη θάλασσα ορίζουμε μια θάλασσα που έχει εκτεθεί σε αέρα ο οποίος πνέει πάνω από μια σημαντικά μεγάλη έκταση της θάλασσας. Το φάσμα JONSWAP περιλαμβάνει επίσης μία παράμετρο  $\gamma$  η οποία παρέχει πληροφορίες σχετικά με το πώς ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας συγκεντρώνεται γύρω από τη συχνότητα αιχμής.

Το φάσμα PM (Pierson-Moskowitz), είναι κατάλληλο για πλήρως ανεπτυγμένη θάλασσα, και βασίζεται σε στοιχεία από τον βόρειο Ατλαντικό. Το φάσμα PM είναι ένα φάσμα μίας παραμέτρου. Για το φάσμα PM αυτή η

παράμετρος είναι η ταχύτητα του ανέμου στα 19,5m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Αυτό το φάσμα είναι ίσο με το φάσμα JONSWAP, όταν  $\gamma = 1$ .



Σχήμα 4.4.1 Φάσμα JONSWAP για  $\gamma = 1$ .

Το παραπάνω σχήμα δείχνει το φάσμα JONSWAP για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου  $\gamma$ . Ο Faltinsen (1990) αναφέρει ότι το 17<sup>ο</sup> ITTC (International Towing Tank Conference), συνιστά την χρησιμοποίηση του φάσματος JONSWAP. Παρακάτω ακολουθεί μια πιο λεπτομερή εξήγηση του τρόπου υπολογισμού του φάσματος.

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} e^{-\frac{5}{4} \left( \frac{\omega_p}{\omega} \right)^4} \gamma e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\omega - \omega_p}{\sigma \omega_p} \right)^2} \quad (5.23)$$

Όπου  $\alpha$  είναι η φασματική παράμετρος,  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $\omega_p$  είναι η συχνότητα αιχμής,  $\gamma$  είναι η παράμετρος peakedness και είναι η παράμετρος του φασματικού πλάτους.

$$\alpha = 5,061 \frac{H_s^2}{T_p^4} (1 - 0,287 \ln \gamma) \quad (5.24)$$

Η παράμετρος του φασματικού εύρους διαφέρει ανάλογα με τη τιμή του  $\omega$ :

$$\sigma = \begin{cases} 0,07 & \text{για } \omega < \omega_p \\ 0,09 & \text{για } \omega > \omega_p \end{cases} \quad (5.25)$$

Γνωρίζοντας τις φασματικές τιμές για διαφορετικές συχνότητες κύματος, μπορούμε να βρούμε τις φασματικές στιγμές, που ορίζονται ως η διακύμανση της ακανόνιστης θάλασσας. Αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της περιόδου του κύματος και του σημαντικού ύψους του κύματος. Οι φασματικές στιγμές μπορούν να υπολογιστούν με την ενσωμάτωση του φάσματος κύματος:

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega \quad (5.26)$$

Όπου το  $n$  ισούται με 0 για την διακύμανση της ανύψωσης, 2 για τη διακύμανση της ταχύτητας και με 4 για την επιτάχυνση της διακύμανσης των κυμάτων. Έχοντας υπολογίσει τις στιγμές, καθώς και το  $m_1$ , οι εκτιμήσεις για τις περιόδους και το σημαντικό ύψος έχουν ως εξής:

$$T_1 = 2\pi \frac{m_0}{m_1} \quad (5.27)$$

$$T_p = 2\pi \sqrt{\frac{m_2}{m_4}} \quad (5.28)$$

$$T_z = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (5.29)$$

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (5.30)$$

Όπως έχουμε αναφέρει προηγουμένως, μια πρόβλεψη κύματος τυπικά παρέχει το  $T_1$  και το  $H_s$ , συνεπώς για να τυποποιηθεί το φάσμα πρέπει να υπολογίζεται μια τιμή για το  $T_p$ . Ο Lloyd (1998) παρέχει μια σχέση μεταξύ της φασματικής περιόδου αιχμής και της μέσης περιόδου του κύματος.

$$T_p = 1.296T_1 \quad (5.31)$$

Με αυτή την σχέση, μπορούμε να υπολογίσουμε την συχνότητα κορυφής και το φάσμα μπορεί να τυποποιηθεί για μια επιλεγμένη παράμετρο.

## 5.6 Υδροδυναμική των κυμάτων και του ανέμου

Όταν ένα πλοίο λειτουργεί σε κύματα και άνεμο μπορεί να υποβληθεί τόσο σε εθελοντική όσο και σε ακούσια απώλεια ταχύτητας. Η εθελοντική απώλεια ταχύτητας οφείλεται στην απόφαση του πλοιάρχου να μειώσει την ταχύτητα, λόγω των κινήσεων και της επιτάχυνσης. Η ακούσια απώλεια ταχύτητας οφείλεται στην προστιθέμενη αντίσταση του ανέμου και των κυμάτων. Στο πρώτο τμήμα αυτής της παραγράφου θα εξετάσουμε τις κινήσεις και τις επιταχύνσεις στις οποίες υπόκεινται το πλοίο, ενώ στο επόμενο τμήμα θα παρουσιάσουμε την ακούσια απώλεια ταχύτητας.

### 5.6.1 Κινήσεις και επιταχύνσεις σε ακανόνιστες θάλασσες

Η αξιολόγηση των κινήσεων ενός πλοίου σε ακανόνιστη θάλασσα ήταν για πολλά χρόνια ένα δύσκολο έργο. Μέχρι πρότινος απλοποιούσαμε την κατάσταση της θάλασσας και θεωρούσαμε ότι υπήρχαν μόνο τακτικά κύματα, αυτό όμως δεν παρείχε μία ρεαλιστική απεικόνιση των κινήσεων του πλοίου. Τις τελευταίες δεκαετίες, οι ερευνητές έχουν αναπτύξει μεθόδους για την ανάλυση των κινήσεων των πλοίων και σε ακανόνιστη θάλασσα. Σύμφωνα με τους Denis και Pierson (1953) η ανταπόκριση του πλοίου μπορεί να αντιμετωπιστεί σαν ένα αναλογικό φίλτρο. Αυτό σημαίνει ότι η είσοδος του φίλτρου είναι τα κύματα με διαφορετικές συχνότητες, και η έξοδος είναι οι κινήσεις και οι επιταχύνσεις του πλοίου.

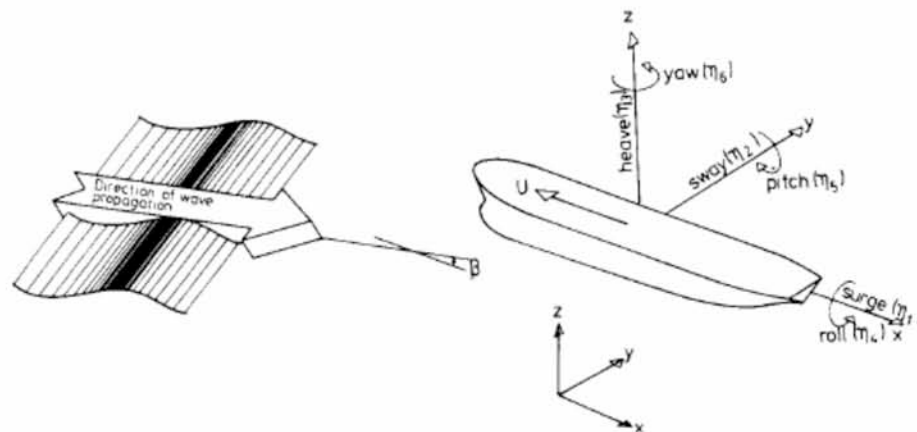
Για να εκτιμήσουμε την συμπεριφορά του πλοίου σε ακανόνιστη θάλασσα, πρώτα θα πρέπει να κατανοήσουμε την συμπεριφορά του πλοίου σε τακτικά, μετωπικά κύματα.

Η θεωρία στην παρούσα ενότητα βασίζεται σε ορισμένες βασικές παραδοχές:

- Εφαρμόζεται γραμμική θεώρηση. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ της ανταπόκρισης του πλοίου και του πλάτους του εμπλεκόμενου κύματος.

- Το σκάφος είναι λεπτό. Το μήκος του κύτους είναι πολύ μεγαλύτερο από το πλάτος του και το ρεύμα της θάλασσας.
- Εφαρμόζεται θεωρία κατάτμησης. Το σκάφος μπορεί να χωριστεί σε τμήματα και οι συνολικές δυνάμεις που ασκούνται στο πλοίο μπορούν να υπολογιστούν αθροίζοντας τις επιμέρους δυνάμεις για όλο το μήκος του πλοίου.
- Εφαρμόζεται θεωρία υποθέσεων. Το νερό θεωρείται ότι είναι ακανόνιστο, ασυμπίεστο και μηδενικής τριβής.

Το πλοίο ορίζεται ως άκαμπτο σώμα που είναι ελεύθερο να κινείται σε έξι βαθμούς.



Σχήμα 5.5.1 Πλοίο με έξι βαθμούς ελευθερίας, Faltinsen (1990)

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα η μετατόπιση ενός πλοίου αναλύεται στις κινήσεις λόγο του κύματος ( $n_1$ ), της ταλάντευσης ( $n_2$ ), και της ανύψωσης ( $n_3$ ) για την  $x$ -,  $y$ - και  $z$  κατεύθυνση και στις γωνιακές μετατοπίσεις του συστήματος συντεταγμένων λόγω της περιστροφής ( $n_4$ ), του κλυδωνισμού ( $n_5$ ) και της εκτροπής ( $n_6$ ). Κάθε κίνηση οποιουδήποτε σημείου στο πλοίο μπορεί να περιγράψει ως:

$$s = (n_1 + zn_5 - yn_6)\vec{i} + (n_2 - zn_4 + xn_6)\vec{j} + (n_3 + yn_4 - xn_5)\vec{k} \quad (5.32)$$

Όπου τα  $x, y$  και  $z$  είναι θέσεις στο σκάφος και  $\vec{i}, \vec{j}$  και  $\vec{k}$  είναι μοναδιαία διανύσματα κατά μήκος του  $x$ -,  $y$ - και  $z$ -άξονα. Οι συναρτήσεις απόκρισης ορίζονται ως εξής:

$$n_j = n_{ja} \cos(\omega t + \varepsilon_n) \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (5.33)$$

Όπου  $n_{ja}$  είναι το εύρος κίνησης και  $\varepsilon$  η γωνία φάσης.

Όπως η συχνότητα του κύματος, έτσι και συναρτήσεις απόκρισης εξαρτώνται από την ταχύτητα και την κατεύθυνση των κυμάτων.

Οι αποκρίσεις βρίσκονται λύνοντας την εξίσωση κίνησης άκαμπτων σωμάτων:

$$\sum_{k=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk}) \ddot{n}_k + B_{jk} \dot{n}_k + C_{jk} n_k] = F_j e^{i\omega t} \quad (5.34)$$

Όπου  $M_{jk}$  είναι ο γενικευμένος πίνακας μάζας,  $A_{jk}$  είναι ο προστιθέμενος πίνακας μάζας,  $B_{jk}$  είναι ο πίνακας γραμμικής απόσβεσης,  $C_{jk}$  είναι το πίνακας δυσκαμψίας και  $F_j$  είναι το διάνυσμα πλάτους των δυνάμεων και των ροπών του κύματος.

Η χρησιμοποιήσει συναρτήσεων μεταφοράς για την αξιολόγηση των κινήσεων του πλοίου αποτελεί κοινή πρακτική. Ως συνάρτηση μεταφοράς για τον αντίστοιχο βαθμό ελευθερίας ορίζεται ο λόγος της απόκριση προς το πλάτος του κύματος.

$$H_j(\omega) = \frac{n_j(\omega)}{\zeta_\alpha} \quad (5.35)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς  $H(\omega)$  καλείται και response amplitude operator, RAO.

Η απόκριση του σκάφους σε ακανόνιστη θάλασσα βρίσκεται συνδυάζοντας τη συνάρτηση μεταφοράς με το φάσμα του κύματος, βλέπε εξίσωση 2.26. Κατά τη διερεύνηση της κίνησης ενός σκάφους στη θάλασσα είναι σύνηθες να παρατηρούμε την τυπική απόκλιση της απόκρισης,  $\sigma_n = \sqrt{m_n}$ , όπου το  $n$  αντιπροσωπεύει τις διαφορετικές κινήσεις του πλοίου. Ο υπολογισμός για την τυπική απόκλιση  $\sigma$  της περιστροφής δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\sigma_{roll}^2 = \int_0^\infty S(\omega) |H_4(\omega)|^2 d\omega \quad (5.36)$$

Στη θάλασσα η τυπική απόκλιση της περιστροφής δεν πρέπει να υπερβαίνει μια ορισμένη τιμή για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια του πληρώματος και του φορτίου. Το κριτήριο αυτό εξαρτάται από τον τύπο του σκάφους και τον σκοπό της



επιχείρησης. Σύμφωνα με το NORDFORSK (1987) τα κριτήρια seakeeping για εμπορικά πλοία είναι  $\sigma_{roll} < 6^0$ .

Ο υπολογισμός της συνάρτησης μεταφοράς για τις σχετικές κάθετες κινήσεις είναι λίγο πιο πολύπλοκος. Δεδομένου ότι η κίνηση είναι στην κατεύθυνση  $-z$ , χρησιμοποιείται η έκφραση που αντιστοιχεί στο διάνυσμα  $\vec{k}$  στην εξίσωση 5.32. Το σημείο που αξιολογείται συνήθως βρίσκεται στην κεντρική γραμμή του πλοίου, το οποίο δίνει  $y = 0$ . Η συνάρτηση μετατόπισης για τις σχετικές κινήσεις είναι η εξής:

$$n_R = n_3 - xn_5 - e^{-ik(x\cos\beta + y\sin\beta)} \quad (5.38)$$

Όπου το  $e^{-ik(x\cos\beta + y\sin\beta)}$  περιγράφει την μη κατανεμημένη ανύψωση του κύματος σε μια δεδομένη θέση, το  $k$  είναι ο αριθμός των κυμάτων και  $\beta$  είναι η κατεύθυνση του κύματος. Οι συναρτήσεις μεταφοράς δίνουν ως αποτελέσματα μιγαδικούς αριθμούς, με ένα πραγματικό και ένα φανταστικό μέρος. Ο Kreyszig (2006) παρέχει μια μέθοδο για τον υπολογισμό της συνάρτησης της σχετικής κάθετης μετατόπισης. Οι απαραίτητες σχέσεις για τον υπολογισμό της συνάρτησης παρουσιάζονται παρακάτω.

$$n_j = r_j e^{i\theta_j} \quad (5.39)$$

$$r_j = \sqrt{\text{real}_j^2 + \text{imaginary}_j^2} \quad \theta_j = \arctan\left(\frac{\text{imaginary}_j}{\text{real}_j}\right) \quad (5.40)$$

$$H_R(\omega) = \frac{r_3 e^{i\theta_3} - x r_5 e^{i\theta_5} - e^{-ik(x\cos\beta + y\sin\beta)}}{\zeta_\alpha} \quad (5.41)$$

Τώρα μπορούμε να υπολογίσουμε την σχετική τυπική απόκλιση της κατακόρυφης μετατόπισης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης.

Σχετική τυπική απόκλιση κατακόρυφης μετατόπισης:

$$\sigma_0^2 = \int_0^\infty S(\omega) |H_R(\omega)|^2 d\omega$$

(5.42)

Σχετική τυπική απόκλιση ταχύτητας:

$$\sigma_2^2 = \int_0^\infty \omega^2 S(\omega) |H_R(\omega)|^2 d\omega$$

(5.43)

Σχετική τυπική απόκλιση επιτάχυνσης:

$$\sigma_4^2 = \int_0^\infty \omega^4 S(\omega) |H_R(\omega)|^2 d\omega$$

(5.44)

Ο NORDFORSK (1987) δίνει διαφορετικά κριτήρια για την κάθετη επιτάχυνση.

*RMS* για κάθετη acc σε FP  $\leq 0.247g$  για  $L \leq 100m$

*RMS* για κάθετη acc σε FP  $\leq 0.050g$  για  $L \leq 300m$

#### 5.6.1.1 Πιθανότητα slamming

Ένα άλλο φαινόμενο που προτιμούμε να αποφεύγουμε στη θάλασσα είναι το slamming. Slamming, είναι ένα φαινόμενο που περιγράφει φορτία με υψηλές αιχμές πίεσης. Αυτά τα φορτία εμφανίζονται όταν ένα σκάφος χτυπά το νερό με υψηλή ταχύτητα. Τα φορτία αυτά που προκύπτουν από τα χτυπήματα του νερού μπορούν να έχουν συνέπειες για το πλήρωμα και το φορτίο, και αν είναι αρκετά, μπορεί επίσης να προκαλέσουν κόπωση και παραμόρφωση του κύτους. Η πλήρη του πλοίου είναι το μέρος όπου τέτοια φορτία είναι το πιο πιθανό να εμφανιστούν, και ως εκ τούτου, αυτή είναι και η περιοχή όπου εκτελούνται οι υπολογισμοί. Η τυπική απόκλιση χρησιμοποιείται ως κριτήριο λειτουργικότητας για τις αποκρίσεις του πλοίου, ενώ κατά την εξέταση του slamming είναι φυσιολογικό να υπολογίζουμε την πιθανότητα πραγματοποιήσεις slamming για ένα δεδομένο φάσμα κύματος. Σύμφωνα με τον Faltinsen (1990) μπορούμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα πραγματοποιήσεις slamming ως εξής:

$$P(\text{slamming}) = e^{-\left(\frac{V_{cr}^2}{2\sigma_2^2} \frac{d^2}{2\sigma_0^2}\right)} \quad (5.45)$$

Όπου  $d$  είναι το ρεύμα και  $V_{cr}$  είναι η οριακή ταχύτητα.

$$V_{cr} = 0.093\sqrt{gL} \quad (5.46)$$

Τα κριτήρια της NORDFORSK (1987) για το slamming είναι:

$$P(\text{slamming}) \leq 0.03 \text{ για } L \leq 100\text{m}$$

$$P(\text{slamming}) \leq 0.01 \text{ για } L \leq 300\text{m}$$

#### 5.6.1.2 Πιθανότητα πράσινου νερού στο κατάστρωμα

Παρότι τα μεγάλα κύματα μπορεί να ωθήσουν τη γάστρα έξω από το νερό μπορεί επίσης να προκαλέσουν ροή υδάτων στο κατάστρωμα του πλοίου. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως πράσινο νερό ή υγρασία του καταστρώματος και μπορεί να προκαλέσει ζημιά στο φορτίο, και να θέσει σε κίνδυνο το πλήρωμα. Το νερό στο κατάστρωμα θα μπορούσε επίσης να επηρεάσει την ευστάθεια του σκάφους για αυτο η σωστή αποστράγγιση είναι ζωτικής σημασίας. Για να υπολογίσουμε την πιθανότητα πράσινου νερού, θα πρέπει να γνωρίζουμε την τυπική απόκλιση των μετατοπίσεων.

$$P(\text{water on deck}) = e^{-\frac{d^2}{2\sigma_0^2}} \quad (5.47)$$

Όπου  $d$  σε αυτή την περίπτωση είναι το ύψος του freeboard του πλοίου. Γενικά με τον όρο freeboard χαρακτηρίζονται τα ορατά μέρη του πλοίου από την ισάλο και πάνω, δηλαδή από την επιφάνεια της θάλασσας όταν αυτό πλέει ζυγοσταθμισμένο ή βρίσκεται σε ηρεμία. Αντίθετος όρος είναι τα ύφαλα ή βρεχάμενα. Με τον ίδιο όρο "έξαλα", ως μέγεθος σε ένα έμπορτο πλοίο χαρακτηρίζεται η απόσταση μεταξύ της ισάλου και του κυρίου

καταστρώματος, εξ ου και ονομάζεται "κατάστρωμα εξάλων" (freeboard deck). Η απόσταση αυτή ονομάζεται ύψος εξάλων (freeboard) και αποτελεί ιδιαίτερο στοιχείο στην ασφάλεια του πλοίου.

Το ελάχιστο ύψος freeboard, (και στη πραγματικότητα το μέγιστο επιτρεπόμενο βύθισμα) κάθε πλοίου κατά εποχές και γεωγραφικές ζώνες καθορίζεται από ειδικό πιστοποιητικό (load line certificate) που εκδίδουν οι Νηογνώμονες ή άλλες κυβερνητικές αρχές, π.χ. η Ε.Ε.Π..

Το κριτήριο seakeeping του NORDFORSK για το νερό στο κατάστρωμα είναι

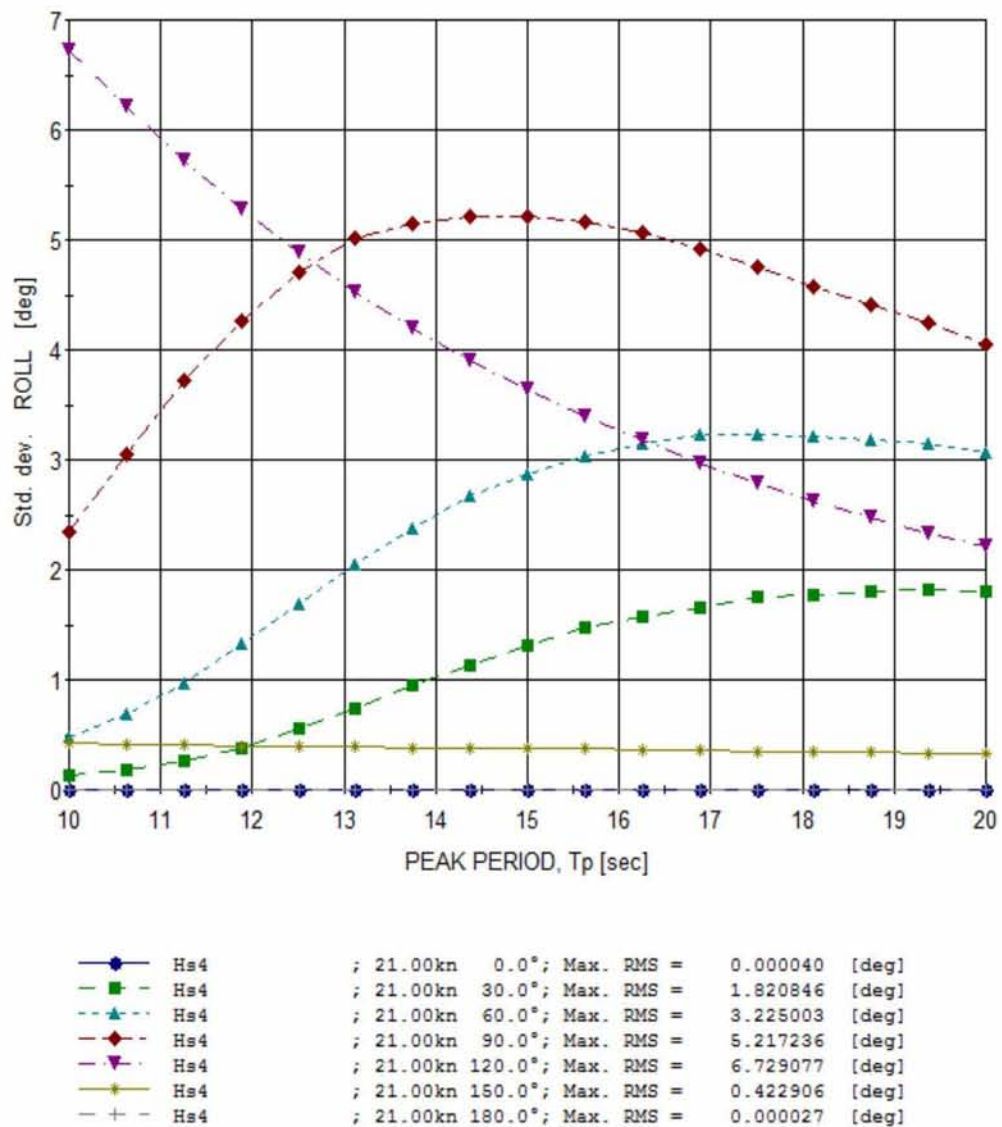
$$P(\text{water on deck}) \leq 0,05$$

### 5.6.2 Υπολογισμοί μετατοπίσεων και επιταχύνσεις

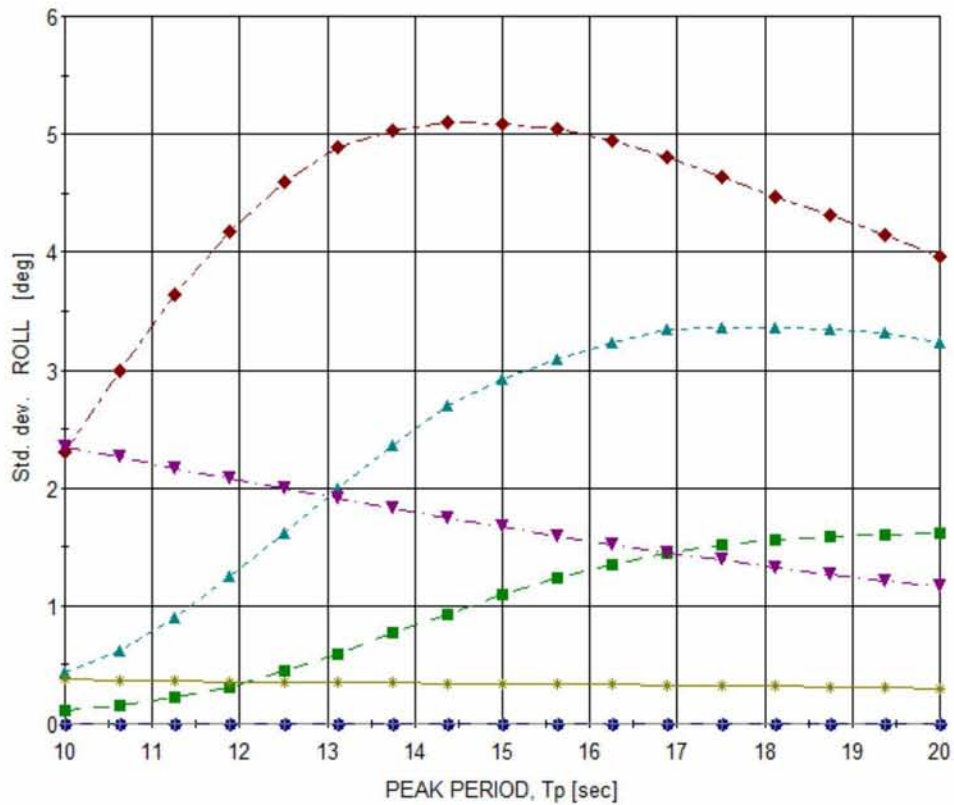
Το Plug-in Veres του ShipX έχει πολλές εφαρμογές, μία από αυτές είναι ο υπολογισμός των κινήσεων του πλοίου σε ήρεμη και ακανόνιστη θάλασσα. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της προστιθέμενης αντίστασης λόγω χειρισμών. Το Veres περιλαμβάνει τέσσερις postprocessors που παρέχουν τη δυνατότητα υπολογισμού των κινήσεων σε ακανόνιστα κύματα, καθώς και την εύρεση της περιοχής λειτουργικότητας του σκάφους. Με τον καθορισμό ενός κριτηρίου, για παράδειγμα του slamming, το ShipX μπορεί να παρέχει πληροφορίες σχετικά με το περιοριστικό ύψος κύματος ή την περίοδο. Για τους σκοπούς αυτής της εργασίας το γενικό αρχείο της συνάρτησης μεταφοράς είναι η ανάλυση Veres. Ωστόσο, οι προ-υπολογισμοί για τον υπολογισμό της λειτουργικότητας και τις επιπτώσεις των ακανόνιστων κυμάτων είναι χρήσιμοι για τη σύγκριση των υπολογισμών που εκτελούνται στο πρόγραμμα. Οι συναρτήσεις μεταφοράς παρουσιάζονται σε ένα αρχείο κειμένου που περιλαμβάνει το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της συνάρτησης μετατόπισης για έξι βαθμούς ελευθερίας. Οι συναρτήσεις υπολογίζονται για διαφορετικές ταχύτητες και κατευθύνσεις.

Οι συναρτήσεις μετατόπισης υπολογίζονται για  $V = 16 \text{ knots}$  και  $V = 25 \text{ knots}$  με βήμα  $1 \text{ knot}$  και για  $T = 2 \text{ s}$  έως  $T = 27 \text{ s}$  με βήμα  $1 \text{ s}$ . Οι κατευθύνσεις κύματος υπολογίζονται σε μία περιοχή από  $0^\circ$  έως  $180^\circ$  με βήμα  $30^\circ$ . Προκειμένου να εξασφαλίσουμε την ακρίβεια των τιμών της τυπικής απόκλισης σε περιόδους αιχμής της περιόδου του κύματος πραγματοποιούμε πρόσθετους υπολογισμούς. Για τη Βόρεια Θάλασσα, η περίοδος αιχμής είναι συνήθως μεταξύ 7 και 13s, επομένως πρόσθετα βήματα της τάξης των 0,5s προστίθεται στους υπολογισμούς του Veres. Οι συναρτήσεις ανύψωσης και κλυδωνισμού δεν εξαρτώνται από το ύψος του κύματος, σε αντίθεση με την περιστροφική κίνηση η οποία εξαρτάται. Συνεπώς θα πρέπει να δημιουργηθούν διαφορετικά αρχεία προκειμένου να υπολογιστεί σωστά η τυπική απόκλιση για την περιστροφική μετατόπιση. Οι συναρτήσεις μετατόπισης για την περιστροφή υπολογίζονται για  $H = 2,4,6,8$  και  $10$  μέτρα.

Τα ακόλουθα στοιχεία προκύπτουν από τον ShipX postprocessor και εμφανίζουν την τυπική απόκλιση για την περιστροφή και τις σχετικές κάθετες αποκρίσεις σε ακανόνιστη θάλασσα.



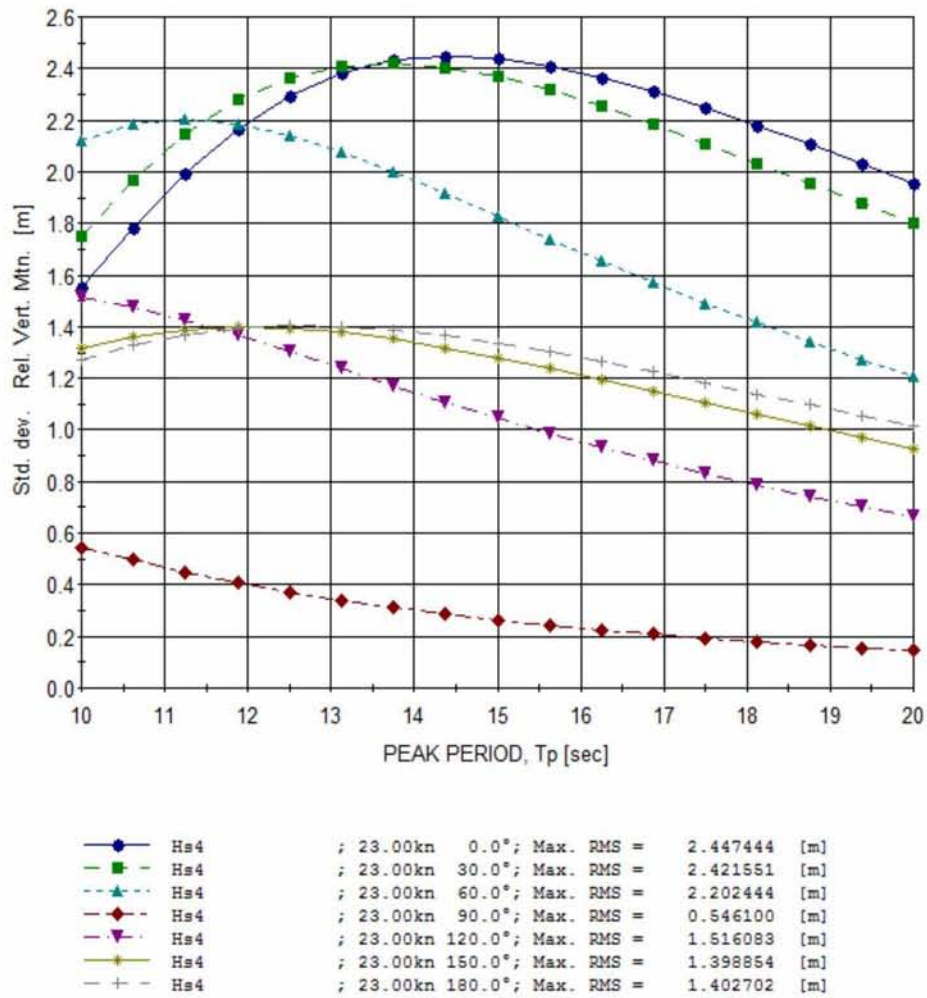
(α) V=21 knots



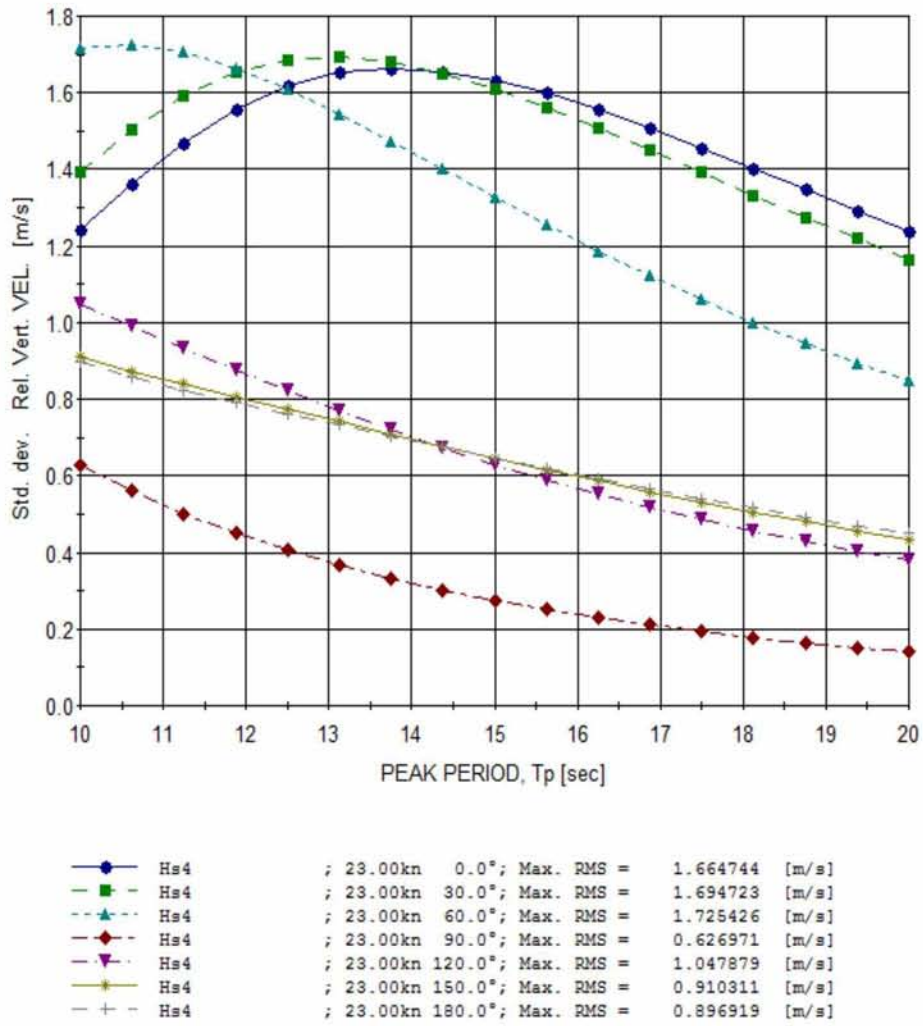
—●—	Hs4	; 23.00kn	0.0°; Max. RMS =	0.000036	[deg]
—■—	Hs4	; 23.00kn	30.0°; Max. RMS =	1.609799	[deg]
—▲—	Hs4	; 23.00kn	60.0°; Max. RMS =	3.355523	[deg]
—◆—	Hs4	; 23.00kn	90.0°; Max. RMS =	5.096526	[deg]
—▼—	Hs4	; 23.00kn	120.0°; Max. RMS =	2.345203	[deg]
—+—	Hs4	; 23.00kn	180.0°; Max. RMS =	0.000011	[deg]

(β) V=23 knots

Σχήμα 5.8.: RMS περιστροφής για  $H_s = 4$



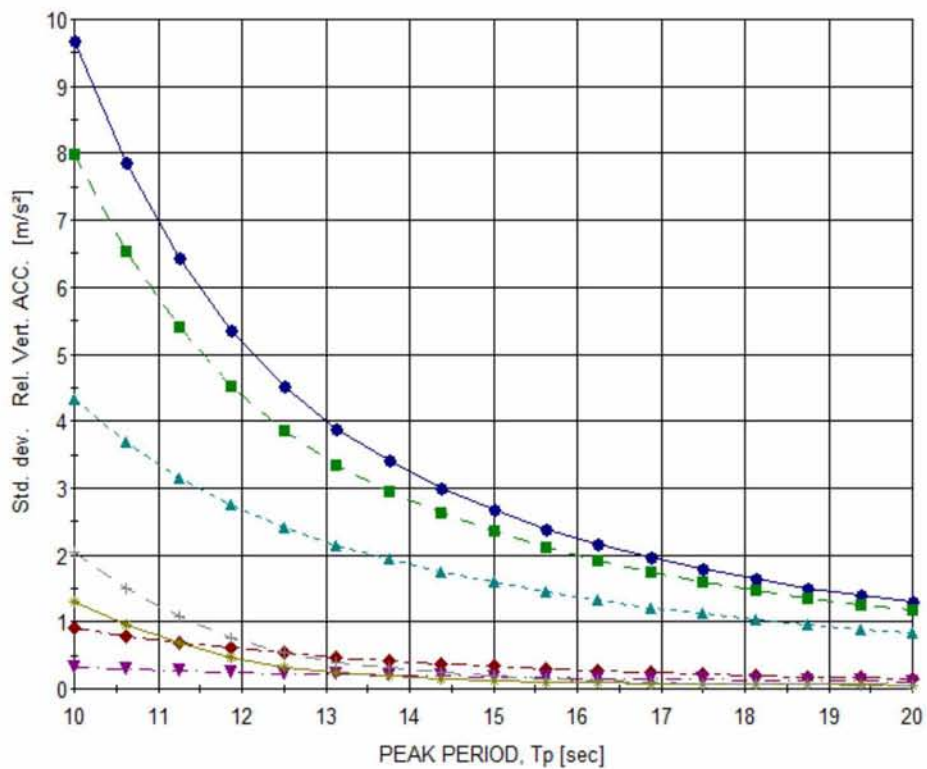
(α) Μετατόπιση



(β) Ταχύτητα

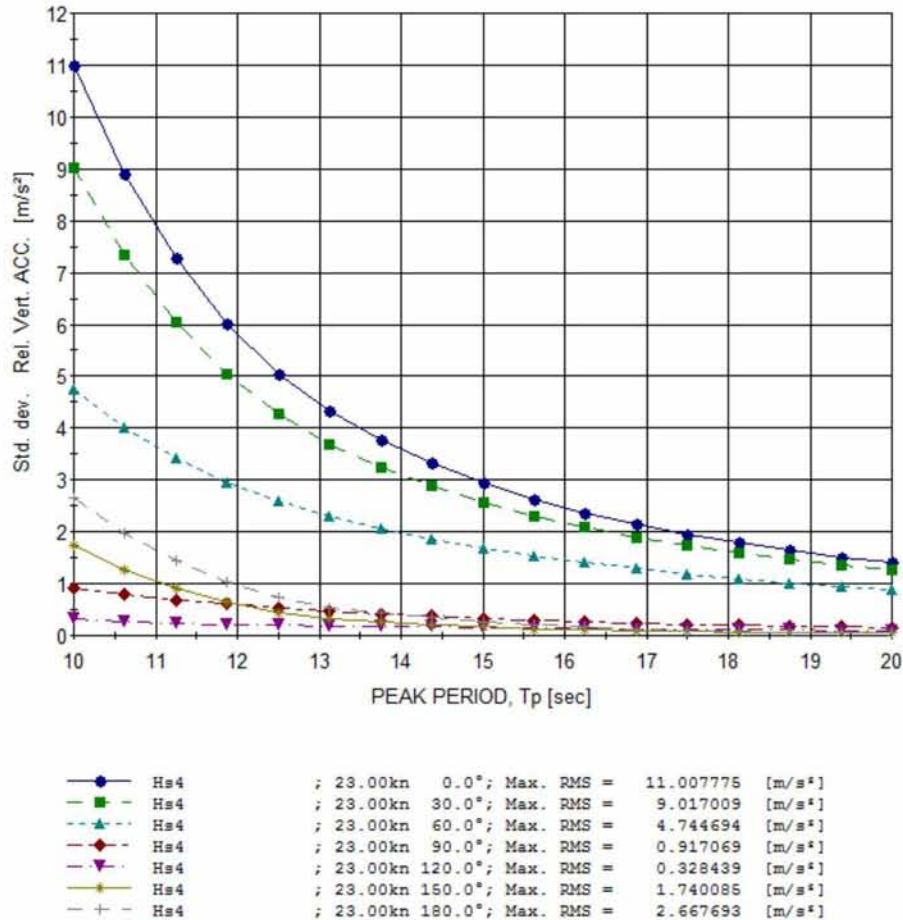
Σχήμα 5.9.: RMS σχετικής κάθετης μετατόπισης για  $H_s = 4$





—●—	Hs4	; 21.00kn	0.0°;	Max. RMS =	9.671990	[m/s²]
—■—	Hs4	; 21.00kn	30.0°;	Max. RMS =	7.976360	[m/s²]
—▲—	Hs4	; 21.00kn	60.0°;	Max. RMS =	4.334624	[m/s²]
—◆—	Hs4	; 21.00kn	90.0°;	Max. RMS =	0.919806	[m/s²]
—▼—	Hs4	; 21.00kn	120.0°;	Max. RMS =	0.313346	[m/s²]
—◆—	Hs4	; 21.00kn	150.0°;	Max. RMS =	1.303488	[m/s²]
—+—	Hs4	; 21.00kn	180.0°;	Max. RMS =	2.036026	[m/s²]

( $\alpha$ ) V=21 knots



(β) V=23 knots

Σχήμα 5.10.: RMS σχετικής κάθετης επιτάχυνσης για  $H_s = 4$

Η ανάλυση του ShipX δείχνει ότι υπάρχουν μεγάλες αποκρίσεις του πλοίου στην περιστροφική μετατόπιση σε θάλασσα δέσμης (sea beam). Μια θάλασσα δέσμης είναι όταν η κατεύθυνση των κυμάτων είναι κάθετη στη γραμμή του ταξιδιού σας. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς οι δυνάμεις στην κατεύθυνση  $\gamma$  είναι σημαντικά υψηλότερες σε θάλασσα δέσμης. Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί ότι μειώνοντας την ταχύτητα κατά 2 κόμβους η περιστροφική απόκριση του σκάφους για  $\beta = 120^\circ$  αυξάνεται σε τιμή υψηλότερη από το κριτήριο λειτουργικότητας της NORDFORSK. Αυτό σημαίνει ότι με μείωση της ταχύτητας, προκειμένου να μειωθούν οι αποκρίσεις δεν είναι ευεργετική μέθοδος για την περιστροφή.

Για να υπολογίσουμε την πιθανότητα του slamming και του νερού στο κατάστρωμα, υπολογίζουμε την συνάρτηση της σχετικής κατακόρυφης μετατόπισης. Η σχετική κατακόρυφη μετατόπιση και η τυπική απόκλιση της ταχύτητας στο FP σε ακανόνιστες θάλασσα φαίνονται στο σχ. 5.9. Στο σχ. 5.10 φαίνονται οι επιταχύνσεις στο FP για δύο διαφορετικές ταχύτητες.

Τα στοιχεία δείχνουν ότι οι κινήσεις και οι επιταχύνσεις μειώνονται με την αύξηση της περιόδου αιχμής. Η μείωση της ταχύτητας του πλοίου θα μειώσει τις κατακόρυφες αποκρίσεις, αλλά το αποτέλεσμα δεν είναι υψηλό για μείωση μόνο 2 κόμβων. Οι επιταχύνσεις υπερβαίνουν το κριτήριο του NORDFORSK για τις περισσότερες από τις περιόδους αιχμής με κατεύθυνση μεταξύ 0 και 60 μοιρών. Ωστόσο, οι σχετικές κατακόρυφες επιταχύνσεις υπολογίζονται με διαφορετική μέθοδο στο ShipX από αυτή που παρουσιάζεται σε αυτή τη διατριβή. Οι σχετικές κάθετες επιταχύνσεις υπολογίζονται στο ShipX σύμφωνα με το πρότυπο ISO 2631/3 - 1985. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται με στόχο τον υπολογισμό και της ναυτίας. Το φάσμα κίνησης χωρίζεται σε διαστήματα συχνότητας όπου η συχνότητα που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό είναι συνάρτηση της συχνότητας του κύματος και του εκτεθειμένου χρόνου, Fathi (2012). Δεδομένου ότι η μέθοδος υπολογισμού των επιταχύνσεων είναι διαφορετική στο ShipX από ό, τι στο υπόλοιπο αυτής της διατριβής, οι τιμές δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν περαιτέρω, αλλά η τάση μπορεί να αξιολογηθεί και να συγκριθεί με τα μεταγενέστερα αποτελέσματα.

### 5.6.3 Πρόσθετη αντίσταση λόγω κυμάτων

Όταν ένα πλοίο κινείται μέσω κυμάτων η αντίσταση ποικίλλει. Αυτό οφείλεται στην ανάκλαση των κυμάτων αλλά και στα κύματα που δημιουργούνται από την κίνηση του πλοίου. Για την ανάλυση και τον υπολογισμό των δυνάμεων που ασκούνται στο πλοίο χρησιμοποιείται θεωρία κατάτμησης .

#### 5.6.3.1 Πρόσθετη αντίσταση από τακτικά κύματα

Η μέθοδος αυτή παρουσιάστηκε από τους Gerritsma και Beukelman (1972). Ισχύει μόνο για μετωπικά θαλάσσια κύματα, αλλά οι Λουκάκης και Σκλαβούνος (1978) γενίκευσαν τη μέθοδο ώστε να ισχύει για διαφορετικούς τύπους κύματος.

Η προστιθέμενη αντίσταση για μετωπικά κύματα υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση.

$$R_{AW} = \frac{k}{2\omega} \int_L \left( B_{33}^{(2D)} + U \frac{d}{dx} A_{33}^{(2D)} \right) \cdot V_{za}^2(x) dx \quad (5.48)$$

Όπου  $k$  είναι ο αριθμός κυμάτων,  $\omega$  είναι η συχνότητα των κυμάτων,  $B_{33}^{(2D)}$  και  $A_{33}^{(2D)}$  είναι η διατομή απόσβεσης και πρόσθετης μάζας σε ταλάντωση,  $V$  είναι η ταχύτητα του πλοίου και  $V_{za}$  είναι το πλάτος της κίνησης μεταξύ του πλοίου και τα κύματα.

Το πλάτος  $V_{za}$  υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$V_{za} = \dot{n}_3 - x \dot{n}_5 - V n_5 - \dot{\zeta}' \quad (5.49)$$

Όπου  $n_3$  και  $n_5$  είναι η μετατόπιση ταλάντωσης και εκτροπής αντίστοιχα.  $\zeta'$  είναι η αποτελεσματική κατακόρυφη μετατόπιση ενός κύματος για μια διατομή. Οι τελείες δείχνουν την παραγωγό ως προς τον χρόνο.

$$\zeta' = \zeta \left( 1 - \frac{k}{y_\omega} \int_{-T}^0 y e^{kz} dz \right) \quad (5.50)$$

Όπου  $\zeta$  είναι η ανύψωση του κύματος,  $T$  είναι το ρεύμα και  $y_\omega$  είναι το μισό πλάτος της ίσαλος γραμμής σε ένα δεδομένο ρεύμα. Αυτός ο τύπος αγνοεί την αντανάκλαση των κυμάτων από την πλώρη, και υποθέτει πως το πλοίο είναι λεπτό.

Οι Λουκάκης και Σκλαβούνος (1978) για να μπορέσουν να υπολογίσουν την αντίσταση των κυμάτων με διαφορετικές κατευθύνσεις έλαβαν υπόψη την κατεύθυνση του κύματος :

$$R_{AW} = |R_T \cos \beta| \quad (5.51)$$

Όπου  $\beta$  είναι η κατεύθυνση του κύματος. Η αντίσταση  $R_T$  περιλαμβάνει πολλούς υπολογισμούς, που δεν θα παρουσιαστούν εδώ.

### 5.6.3.2 Πρόσθετη αντίσταση σε ακανόνιστα κύματα

Η μέση πρόσθετη αντίσταση για μια δεδομένη κατάσταση της θάλασσας υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την σταθερά προσθετής αντίστασης.

$$C_{AW} = \frac{R_{AW}}{\zeta_\alpha^2} \quad (5.52)$$

Η σταθερά αυτή καλείται επίσης και πρόσθετη αντίσταση χειρισμών, ARO.

Η μέση προστιθέμενη αντίσταση που οφείλεται σε όλα τα κύματα που συναντά το πλοίο στο φάσμα του κύματος:

$$\bar{R}_{AW} = 2 \int_0^{\infty} C_{AW} S(\omega) d\omega \quad (5.53)$$

#### 5.6.4 Πρόσθετη αντίσταση λόγω του ανέμου

Η αντίσταση που προσθέτει ο αέρας σε ένα σκάφος οφείλεται τόσο στην ταχύτητα του πλοίου όσο και στην ταχύτητα του ανέμου. Η αντίσταση αυτή μπορεί να διαχωριστεί σε αέρας και στην αντίσταση του αέρα. Σύμφωνα με τον Lloyd (1998), η αντίσταση λόγω του αέρα μπορεί να οριστεί ως:

$$R_{AA} = C_D \frac{1}{2} \rho_A V^2 A_T \quad (5.54)$$

Όπου  $C_D$  είναι ο συντελεστής της οπισθέλκουσας του κύτους πάνω από την ίσαλο γραμμή,  $\rho_A$  είναι η πυκνότητα του αέρα,  $V$  είναι η ταχύτητα του πλοίου και  $A_T$  είναι η εγκάρσια προβαλλόμενη περιοχή.

Ο συντελεστής της οπισθέλκουσας για το σκάφος μπορεί να βρεθεί από την εκτέλεση μιας δοκιμής σε μια αεροδυναμική σήραγγα της ενός υπό κλίμα μοντέλου. Οι Steen και Minsaas (2012) αναφέρουν ότι τυπικές τιμές για το συντελεστή αυτό είναι από 0,5 έως 0,8.

Συμπεριλαμβάνοντας την ταχύτητα του ανέμου  $V_W$ , η αντίσταση, τόσο για τον αέρα όσο και τον άνεμο για μετωπικό άνεμο γίνεται:

$$R_{AAwind} = C_D \frac{1}{2} \rho_A (V_W + V)^2 A_T \quad (5.55)$$

Με την εξαγωγή του στοιχείου του ανέμου από την εξίσωση 2.55, διαπιστώνουμε ότι η προστιθέμενη αντίσταση λόγω του ανέμου είναι:

$$R_{AAwind} = C_D \frac{1}{2} \rho_A (V_W^2 + 2V_W V) A_T \quad (5.56)$$

$V_w$  είναι η ταχύτητα της συνιστώσας του ανέμου που εφαρμόζεται προς την αντίθετη κατεύθυνση της κίνηση του σκάφους. Όταν το σκάφος είναι εκτεθειμένο σε άνεμο από άλλες κατευθύνσεις, διαφορετικές από τον μετωπικό άνεμο, ο συντελεστής της οπισθέλκουσας αλλάζει.

### 5.6.5 Απώλεια ταχύτητας λόγω κυμάτων και του ανέμου

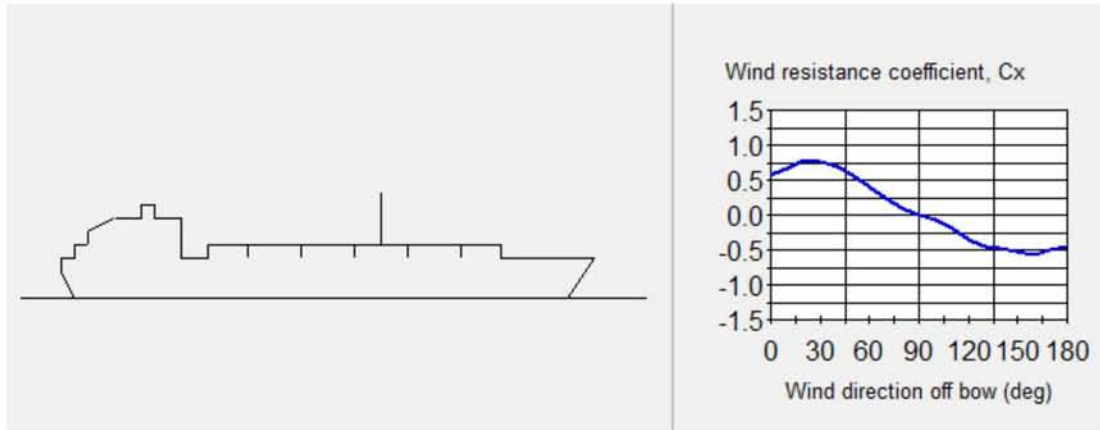
Το plug-in του ShipX, Ship speed και Powering κυρίως χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της αντίστασης σε ήρεμα νερά και της πρόωσης. Ωστόσο, το plug-in μπορεί επίσης να υπολογίσει την απώλεια ταχύτητας λόγω κυμάτων και του ανέμου. Δεδομένου ότι η δοκιμή μοντέλο παρέχει πληροφορίες σχετικά με την αντίσταση σε ήρεμα νερά και την πρόωση, ο υπολογισμός της απώλειας της ταχύτητας παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον. Για να το κάνουμε αυτό τον υπολογισμό θα πρέπει να πραγματοποιήσουμε έναν υπολογισμό Veres συμπεριλαμβανομένης της προστιθέμενης αντίστασης.

Το πρόγραμμα υπολογισμού πορείας σε προγραμματιστικό περιβάλλον C θα πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργήσει για όλους τους ωκεανούς και σε όλες τις εποχές. Το αρχείο εξόδου της απώλειας ταχύτητας από το ShipX είναι το αρχείο εισόδου στο πρόγραμμα Weather Routing, το οποίο ορίζει και την εφικτή ταχύτητα του σκάφους σε μια δεδομένη κατάσταση της θάλασσας, συμπεριλαμβάνοντας όλες τις πιθανές καταστάσεις της θάλασσας στις οποίες μπορεί να εκτεθεί το πλοίο. Το εύρος του  $H_s$  είναι από 1 έως 12m με ένα βήμα 1m.

Το εύρος της  $T_p$  είναι από 2 έως 20s με ένα βήμα 1s. Το κατεύθυνση του κύματος είναι η ίδια όπως και για τους υπολογισμούς Veres.

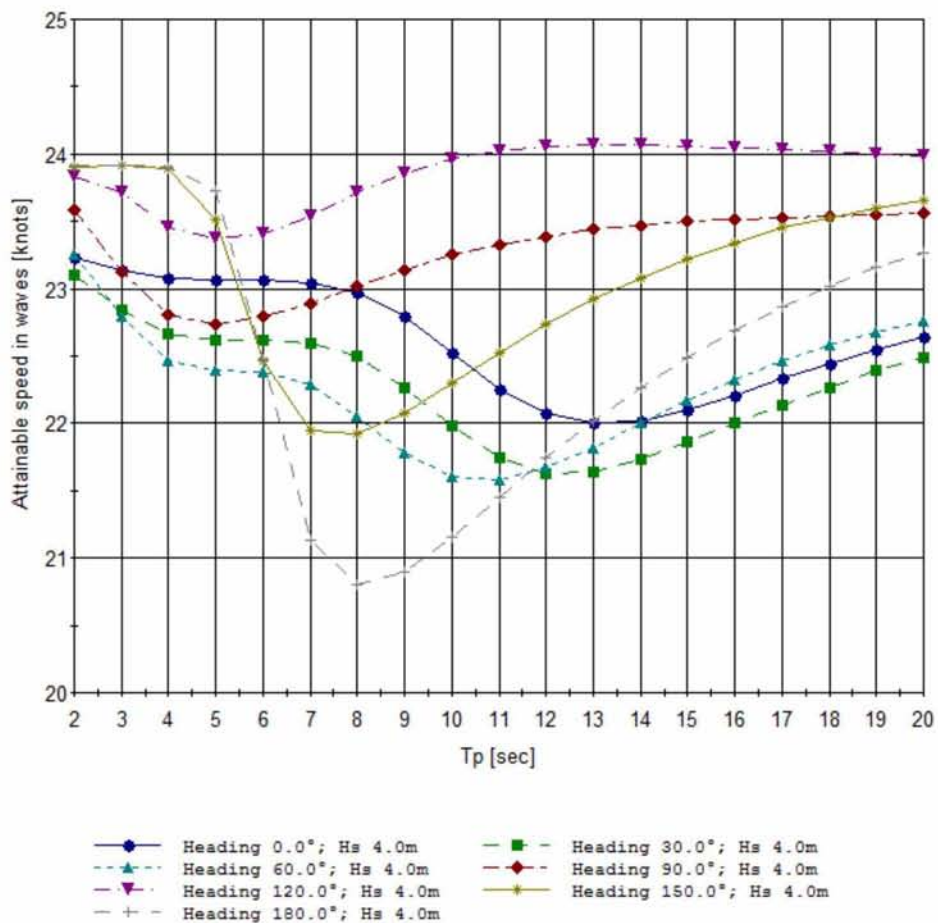
$$V_{wind} = \sqrt{\frac{9.81H_s}{0.21}} \quad (5.57)$$

Όταν η ταχύτητα του ανέμου υπολογίζεται απευθείας από το ύψος κύματος, υποθέτουμε ότι η κατεύθυνση του ανέμου είναι η ίδια με την κατεύθυνση των κυμάτων. Ο συντελεστής της οπισθέλκουσας εξαρτάται από τον τύπο του σκάφους και την κατεύθυνση του, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 5.11 .: Σταθερά αντίστασης του ανέμου vs κατεύθυνση του ανέμου

Έχουμε πλέον όλες τις πληροφορίες που απαιτούνται για τον υπολογισμό της απώλειας ταχύτητας. Η έξοδος από το ShipX περιλαμβάνει τόσο την εφικτή ταχύτητα στα κύματα και τον άνεμο, καθώς και την απαιτούμενη δύναμη για μια δεδομένη κατάσταση θάλασσας. Η εφικτή ταχύτητα για διαφορετικές περιόδους κύματος και κατεύθυνσης με σημαντικό ύψος κύματος 4m φαίνεται στο σχ. 5.12.



Σχήμα 5.12 .: Εφικτές ταχύτητες στα κύματα και τον άνεμο

Το σχήμα δείχνει ότι οι πιο ευεργετικές κατευθύνσεις είναι των  $90^\circ$  και των  $120^\circ$ , όπου με  $0^\circ$  ορίζεται η μετωπική θάλασσα. Κατά την πλοήγηση ενός σκάφους είναι επιθυμητό να ακολουθούμε μία από αυτές τις κατευθύνσεις για τις περισσότερες από τις συνήθεις περιόδους κύματος. Για  $\beta = 180^\circ$ , η εφικτή ταχύτητα για  $T_p = 8s$  είναι πολύ χαμηλή. Αυτό είναι διαφορετικό από ό, τι θα αναμενόταν, καθώς η ακολουθούμενη θάλασσα θα έπρεπε κανονικά να δίνει χαμηλή προστιθέμενη αντίσταση, και ως εκ τούτου υψηλή εφικτή ταχύτητα. Ωστόσο, όταν εξετάζεται το αρχείο μετατόπισης για την προστιθέμενη αντίσταση, η ARO για  $\beta = 180^\circ$  είναι υψηλή για όλες τις ταχύτητες πάνω από 19 κόμβους. Μια φυσική εξήγηση για αυτό δεν είναι προφανής και για να γίνει κατανοητό θα πρέπει να μελετήσουμε τους υπολογισμούς της ARO με μεγάλη λεπτομέρεια. Αυτό όμως είναι πολύ χρονοβόρο, και για τον λόγο αυτό οι τιμές της εφικτής ταχύτητας γίνονται απλά αποδεκτές και χρησιμοποιούνται περαιτέρω στους υπολογισμούς.

V	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$\beta=180^\circ$	-2,4	-0,9	1,6	5,3	11,7	23,4	28,5	30,5	32,5	34,0
$\beta=0^\circ$	1,3	1,2	1,1	1,0	1,0	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7

Πίνακας 5.4: ARO για  $T=8s$

Από τα αποτελέσματα του ShipX μπορεί να εξαχθεί το εξής συμπέρασμα: Η κρίσιμη κατεύθυνση όσον αφορά την κάθετη επιτάχυνση είναι  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  και  $60^\circ$ . Η κρίσιμη κατεύθυνση όσον αφορά την περιστροφή είναι  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  και  $120^\circ$ . Παρόλο που οι RMS για την κατακόρυφη επιτάχυνση μειώνονται ελαφρώς με τη μείωση της ταχύτητας, οι τιμές της περιστροφής αυξάνονται σημαντικά. Μπορεί να φανεί από σχ. 2.12 ότι η πιο ευεργετική κατεύθυνση όσον αφορά την προστιθέμενη αντίσταση είναι  $90^\circ$  και  $120^\circ$ , αυτό μπορεί και πάλι να δώσει πολύ υψηλές αποκρίσεις στην περιστροφή. Δεδομένου ότι υπάρχουν πολλοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη, ένα αποτελεσματικό εργαλείο βελτιστοποίησης είναι πολύ χρήσιμο.



## 6. Αλγόριθμος βελτιστοποίησης δικτύου και δρομολόγησης

Σε αυτή τη διατριβή ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση καυσίμου για ένα συγκεκριμένο ταξίδι. Αυτό γίνεται με τη βελτιστοποίηση του δικτύου. Μια πλήρης περιγραφή της μεθόδου και υποκείμενοι αλγόριθμοι παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο. Όπως αναφέρεται στην παράγραφο 1.5 ένα μοντέλο βελτιστοποίησης περιλαμβάνει συνήθως μια αντικειμενική συνάρτηση, μία ή περισσότερες μεταβλητές απόφασης και ένα σύνολο περιορισμών. Η αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται ως:

$$\min FC(a) \tag{6.1}$$

Όπου  $FC$  είναι η κατανάλωση καυσίμου ως συνάρτηση της πορείας  $a$  του πλοίου. Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση καυσίμου, όπως η απόσταση και η ταχύτητα, η οποία εξαρτάται από την κατάσταση της θάλασσας. Στην δική μας περίπτωση, η απόσταση και η κατάσταση της θαλάσσης έχει προκαθοριστεί και η μόνη παράμετρος που μπορεί να αλλάξει είναι η διαδρομή, δηλαδή η πορεία του πλοίου. Αυτό ορίζει το  $a$  ως την μεταβλητή απόφασης σε αυτό το μοντέλο βελτιστοποίησης. Η αντικειμενική συνάρτηση υποβάλλεται σε μια σειρά περιορισμών κίνησης:

Πιθανότητα slamming <Κριτήριο slamming

Πιθανότητα υγρασίας καταστρώματος <Κριτήριο υγρασίας καταστρώματος

RMS περιστροφής <Κριτήριο περιστροφής

RMS σχετικής κατακόρυφης επιτάχυνσης <Κριτήριο επιτάχυνσης

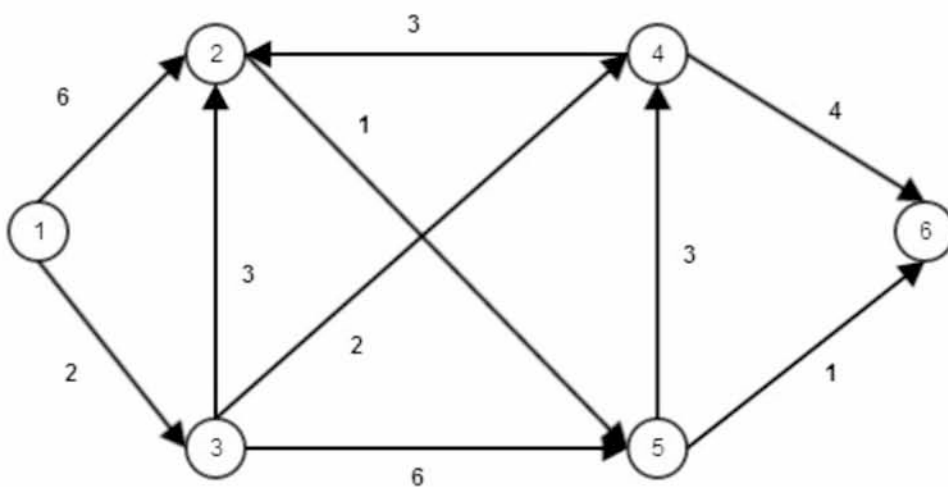
Για να είναι έγκυρη η τελική διαδρομή θα πρέπει να ικανοποιούνται αυτοί οι περιορισμοί. Όταν η θάλασσα είναι πολύ ταραγμένη είναι πιθανό να μην είναι δυνατόν να ικανοποιηθούν αυτά τα κριτήρια, και το αποτέλεσμα μπορεί είναι μια εξαιρετικά δαπανηρή διαδρομή, βλέπε κεφάλαιο. 3.2.4. Αυτό θέτει σε κίνδυνο το μοντέλο, και περιορίζει την εφαρμογή του. Εάν δεν είναι δυνατό να βρεθεί μια διαδρομή που ικανοποιεί τους περιορισμούς, αλλά μια προτεινόμενη διαδρομή εξακολουθεί να είναι επιθυμητή, θα πρέπει να προσαρμοστούν τα κριτήρια.

### 6.1 Βελτιστοποίηση του δικτύου

Κατά την δημιουργία ενός προγράμματος Weather Routing είναι χρήσιμο να εξετάσουμε το πρόβλημα ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης δικτύου και να εφαρμόσουμε έναν αλγόριθμο συντομότερης διαδρομής ώστε να βρούμε την ελάχιστη κατανάλωση καύσιμου ή την πορεία που απαιτεί το μικρότερο χρονικό

διάστημα μεταξύ του σημείου έναρξης και του σημείου τερματισμού. Αυτή η προσέγγιση είναι παρόμοια με την μέθοδο που ακολουθούμε στον δυναμικό προγραμματισμό, αλλά είναι απλούστερη. Ο δυναμικός προγραμματισμός χρησιμοποιείται κυρίως όταν το πρόβλημα είναι δύσκολο να προσδιοριστεί. Σε αυτή την περίπτωση όλες οι πληροφορίες σχετικά με τη διαδρομή είναι προκαθορισμένες, καθιστώντας την κατασκευή ενός δικτύου πιο εύκολη. Στην μέθοδο της βελτιστοποίησης, το δίκτυο ορίζεται ως ένα γράφημα το οποίο αποτελείται από κόμβους και τόξα. Σε πολλά προβλήματα βελτιστοποίησης, οι κόμβοι ορίζονται ως γεωγραφικές περιοχές, για παράδειγμα εγκαταστάσεις παραγωγής, καταστήματα ή στάσεις λεωφορείων. Τα τόξα ορίζονται ως μονοπάτια μεταξύ των κόμβους. Το κόστος μπορεί να επηρεαστεί από την απόσταση, την μέθοδο μεταφοράς ή το πρόσθετο κόστος για την επίσκεψη των κόμβων με μη βέλτιστη σειρά.

Ένα γράφημα  $G=(N,B)$  περιλαμβάνει το σύνολο των κόμβων  $N=\{n_1,n_2,n_3,\dots\}$  και των τόξων  $B=\{b_1,b_2,b_3,\dots\}$ . Ένα τόξο μπορεί να είναι προσανατολισμένο, το οποίο σημαίνει ότι διαθέτει δεδομένη αρχή και τέλος ή μπορεί να μην είναι προσανατολισμένο και να επιτρέπει τη ροή και προς τις δύο κατευθύνσεις. Αν όλα τα τόξα του γραφήματος είναι προσανατολισμένα αναφερόμαστε σε αυτό ως προσανατολισμένο γράφημα. Το πρόβλημα της δρομολόγησης είναι κατάλληλο ώστε χρησιμοποιήσουμε ένα προσανατολισμένο γράφημα δεδομένου ότι το πλοίο ταξιδεύει μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, και ως εκ τούτου, δεν επιτρέπουμε στα τόξα να έχουν ροή και προς τις δύο κατευθύνσεις. Ένα παράδειγμα τέτοιου δικτύου παρουσίασε ο Lundgren et al. (2010) και δίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 6.1. Παράδειγμα προσανατολισμένου δικτύου

Σε αυτό το δίκτυο έχουμε έξι κόμβους και δέκα τόξα με συγκεκριμένα κόστη. Το συντομότερο μονοπάτι από τον κόμβο 1 έως τον κόμβο 6 είναι: 1 - 3 - 2 - 5 - 6. Ένας αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό αυτού του μονοπατιού παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα.

### 6.1.1 Αλγόριθμος Dijkstra

Ο αλγόριθμος Dijkstra παρουσιάστηκε από τον Dijkstra το 1959, και είναι ένας αλγόριθμος αναζήτησης σε γράφημα. Ο αλγόριθμος Dijkstra μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να λύσει ένα πρόβλημα συντομότερης διαδρομής, όταν το δίκτυο αποτελείται από κόμβους και τόξα με μη αρνητικό κόστος. Αυτό ισχύει στα προβλήματα δρομολόγησης, δεδομένου ότι δεν θα υπάρξει ποτέ αρνητικός χρόνος ή αρνητική κατανάλωση καυσίμου για ταξίδια από τον ένα κόμβο στον άλλο. Το αποτέλεσμα αυτού του αλγορίθμου είναι το συντομότερο μονοπάτι μεταξύ του αρχικού κόμβου και του κόμβου προορισμού, το οποίο παρουσιάζει τους κόμβους που επισκεφτήκαμε και το συνολικό κόστος. Στον Αλγόριθμο 6.1 ο δείκτης  $i$  προσδιορίζει τον κόμβο που βρισκόμαστε, το  $j$  ορίζει τον επόμενο κόμβο και  $c_{ij}$  είναι το κόστος της διαδρομής από τον κόμβο  $n_i$  στον κόμβο  $n_j$ .

#### Αλγόριθμος 6.1 Αλγόριθμος του Dijkstra

**Βήμα 0:** Αυτό είναι το αρχικό βήμα. Το σύνολο των κόμβων χωρίζονται σε δύο υποσύνολα  $A = \{\text{searched}\}$  και  $D = \{\text{non searched}\} = N$ , για παράδειγμα όλους τους κόμβους. Στον πρώτο κόμβο,  $n_s$ , αναθέτουμε μια ετικέτα  $(p_s, y_s)$ , όπου  $p_s$  είναι ο προηγούμενος κόμβος που επισκεφτήκαμε και  $y_s$  το κόστος του κόμβου.  $(p_s, y_s) = (-, 0)$ . Σε όλους τους άλλους κόμβους εκτός από τον αρχικό, δίνουμε αρχικό κόστος ίσο με  $\infty$ .

**Βήμα 1:** Στο υποσύνολο  $D$ , προσδιορίζουμε τον κόμβο με το χαμηλότερο κόστος. Ορίζουμε αυτόν τον κόμβο ως  $n_i$ .

**Βήμα 2:** Εξετάζουμε όλα τα τόξα που ξεκινούν από τον κόμβο  $n_i$ . Αν το κόστος,  $c_{ij}$ , για να πάμε στον επόμενο κόμβο συν το συνολικό κόστος της διανυόμενης διαδρομής από τον κόμβο  $i$ ,  $y_s$ , είναι μικρότερο από το τρέχων κόστος του κόμβου  $j$ , ο κόμβος  $n_j$  παίρνει μια νέα ετικέτα  $(p_j, y_j) = (i, y_i + c_{ij})$ . Αν ο κόμβος  $n_j$  ανήκει στο υποσύνολο  $A$  τον μετακινούμε στο υποσύνολο  $D$ . Όταν αναθέτουμε σε ένα κόμβο νέο κόστος θα πρέπει να επανεξετάσουμε όλα τα τόξα που εκκινούν από τον κόμβο αυτό.

**Βήμα 3:** Μετακινούμε τον κόμβο  $n_i$  από το υποσύνολο  $A$  στο υποσύνολο  $D$

**Βήμα 4:** Αν  $A = N$ , δηλαδή αν έχουν ελεγχθεί όλοι οι κόμβοι, σταματάμε. Αν όχι, επιστρέφουμε στο βήμα 1.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για το δίκτυο που φαίνεται στο σχ. 6.1:

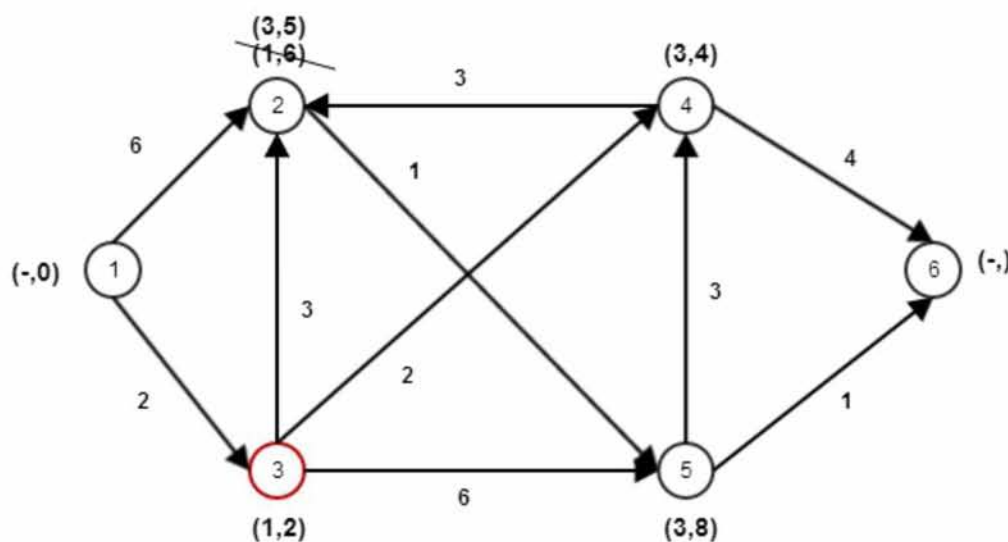
**Βήμα 1:** Ξεκινώντας τον έλεγχο από τον κόμβο  $n_1$  βλέπουμε ότι ο  $n_2$  παίρνει ετικέτα (1,6) και ότι ο  $n_3$  παίρνει ετικέτα (1,2). Ο  $n_3$  είναι ο κόμβος με το ελάχιστο κόστος, οπότε ο  $n_3$  γίνεται ο  $n_i$ .

**Βήμα 2:** Προσπελάσιμοι κόμβοι από τον  $n_3$  είναι οι 2, 4 και 5. Το συνολικό κόστος του προκύπτει για τον  $n_4$  είναι 4 και ο κόμβος παίρνει ετικέτα (3,4). Ο  $n_5$  παίρνει ετικέτα (3,8). Ο κόμβος  $n_2$  έχει από το προηγούμενο βήμα ετικέτα (1,6), αλλά παρατηρούμε ότι το κόστος του ταξιδιού μέσω του  $n_3$  είναι χαμηλότερο, επομένως ο κόμβος  $n_2$  αλλάζει ετικέτα και γίνεται (3,5). Κανένας από τους κόμβους που έχουμε φτάσει δεν έχει ελεγχθεί, οπότε όλοι οι κόμβοι είναι στο υποσύνολο D

**Βήμα 3:** Μετακινούμε τον κόμβο 3 από το υποσύνολο D στο υποσύνολο A

**Βήμα 4:** Επιστρέφουμε στο βήμα 1 και επιλέγουμε τον κόμβο με το ελάχιστο κόστος: Τον κόμβο  $n_4$

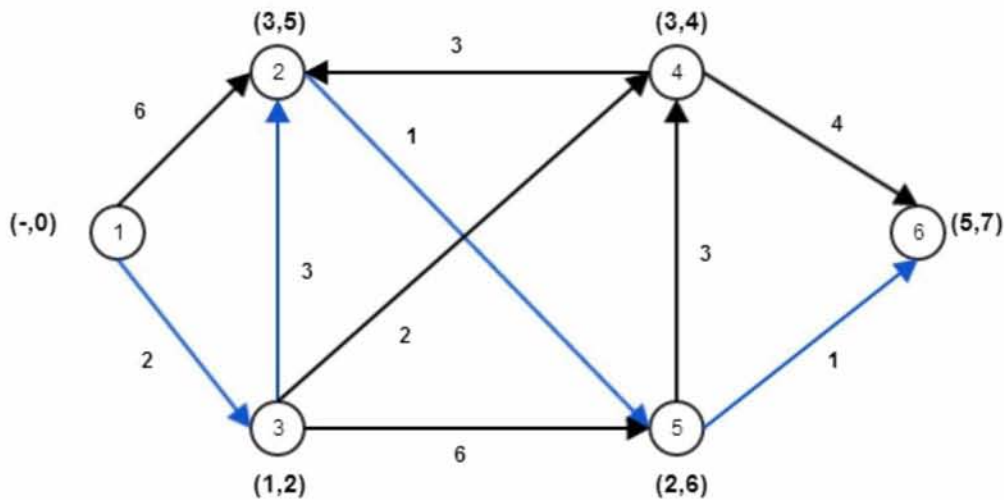
Το παρακάτω σχήμα δείχνει το δίκτυο μετά τον πρώτο έλεγχο.



Σχήμα 6.2 Πρώτος έλεγχος του δικτύου

Στον τέταρτο έλεγχο παρατηρούμε ότι ο κόμβος  $n_5$  παίρνει μια νέα ετικέτα. Στον δεύτερο έλεγχο ο  $n_5$  είχε ετικέτα (3,8), αλλά όταν επανεξετάζουμε την διαδρομή από τον  $n_2$  μπορούμε να δούμε ότι η διαδρομή προς τον κόμβο  $n_5$  μέσω του  $n_2$ , έχει χαμηλότερο κόστος και η νέα ετικέτα του  $n_5$  είναι (2,6). Η διαδικασία

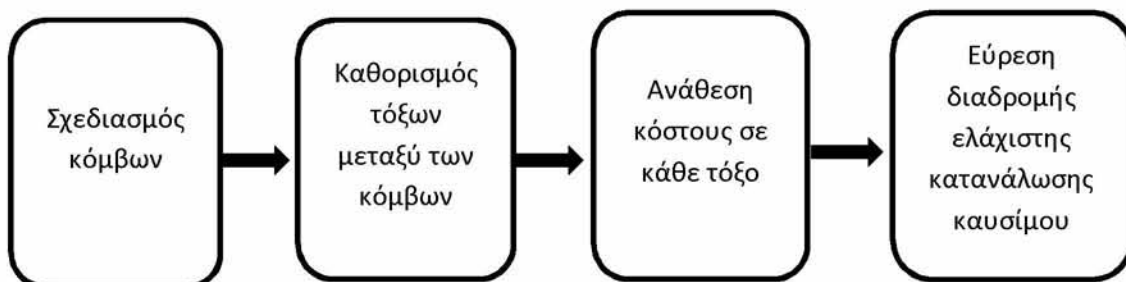
αυτή συνεχίζεται έως ότου εξετάσουμε όλους τους κόμβους και βρεθεί η τελική βέλτιστη διαδρομή. Η τελική διάταξη και η συντομότερη διαδρομή για το δίκτυο παρουσιάζεται στο σχ. 6.3.



Σχήμα 6.3 Συντομότερη διαδρομή

## 6.2. Αλγόριθμος δρομολόγησης

Σε αυτή την εργασία, οι κόμβοι ορίζονται ως γεωγραφικές συντεταγμένες, τα τόξα είναι οι πιθανές διαδρομές με τις οποίες μπορεί να ταξιδέψει το πλοίο μεταξύ των κόμβων και ως κόστος των τόξων ορίζουμε την κατανάλωση καυσίμου. Η κύρια ροή του αλγορίθμου δρομολόγησης είναι:



Σχήμα 6.4 Αλγόριθμος δρομολόγησης

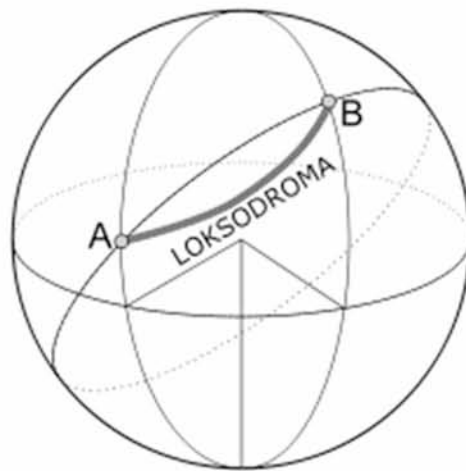
Κάθε ένα από αυτά τα βήματα περιλαμβάνει περαιτέρω υπολογισμούς, τους οποίους θα παρουσιάσουμε λεπτομερώς σε αυτή την ενότητα.

### 6.2.1. Πλοήγηση

Κατά τον καθορισμό μιας διαδικασίας δρομολόγησης θα πρέπει να είμαστε λίγο εξοικειωμένοι με κάποιους όρους πλοήγησης. Κατά την πλοήγηση σε μια σφαίρα έχουμε δύο επιλογές, μπορούμε να πλοηγηθούμε με Λοξοδρομία ή με

Ορθοδρομία, Bowditch (2002). Η λοξοδρομία, (loxodromes), παρουσιάζεται στο χάρτη ως μια ευθεία γραμμή. Εάν η γη ήταν επίπεδη, η γραμμή αυτή θα ήταν η συντομότερη διαδρομή μεταξύ δύο σημείων. Με τον ναυτικό όρο λοξοδρομική πλεύση ή λοξοδρομικός πλους ή απλούστερα Λοξοδρομία (plain sailing ή Mercator's sailing ή Rhumb line)\* χαρακτηρίζεται αφενός μεν ο πλους εκείνος που πραγματοποιεί ένα πλοίο από ένα σημείο της Γης σε άλλο, πλέοντας με σταθερή πορεία ακολουθώντας έτσι μια καμπύλη, καλούμενη λοξοδρομική καμπύλη, που τέμνει τους μεσημβρινούς υπό σταθερή γωνία, αφετέρου η κατ' ενάντια του ανέμου πλεύση κυρίως ιστιοφόρου που ακολουθεί πορεία τεθλασμένης γραμμής κοινώς λεγόμενη "με βόλτες" ή "με λούγκα βόλτες" ή και παλαιότερα λεγόμενη "τόκα-μπουρίνα" που πολλοί εν προκειμένω την χαρακτηρίζουν επίσημα ως πλαγιοδρομία (μόνο για ιστιοφόρα).

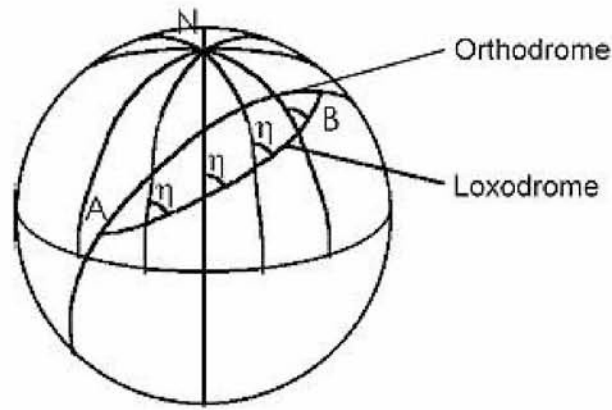
(\*) Εκτός των Άγγλων οι περισσότεροι ναυτικοί λαοί χρησιμοποιούν τον ελληνικό όρο "Loxodroma".



Σχήμα 6.5 Λοξοδρομικός πλους από τόπο A (μεσημβρινό) σε τόπο B (μεσημβρινό)

Η χρήση της λοξοδρομίας κατά την πλοήγηση έχει το όφελος ότι ο πλοίαρχος μπορεί να κρατήσει μια σταθερή κατεύθυνση.

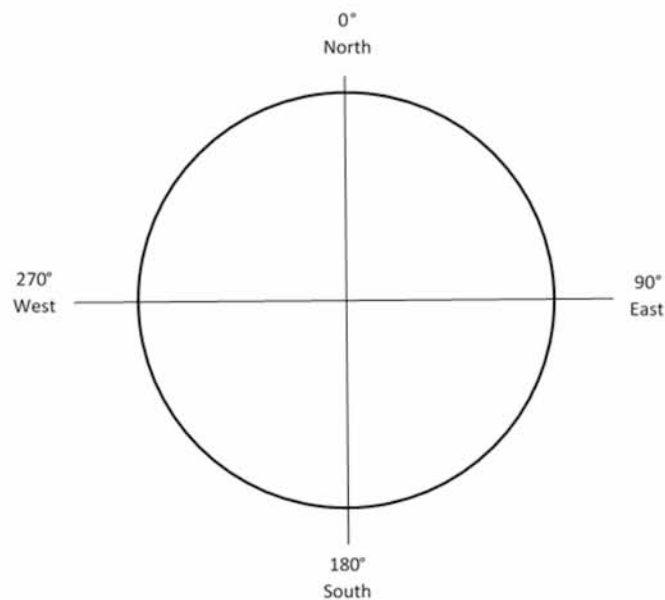
Ως ορθοδρομία (orthodrome) ορίζεται η συντομότερη γραμμή μεταξύ δύο σημείων σε μια σφαίρα. Ως εκ τούτου, για ήρεμα νερά, η ορθοδρομία είναι η διαδρομή με την μικρότερη κατανάλωση καυσίμων. Ωστόσο, κατά τη χρήση της ορθοδρομίας στην ναυσιπλοΐα, ο πλοίαρχος θα πρέπει συνεχώς να αλλάζει την κατεύθυνση του σκάφους.



Σχήμα 6.6 Σύγκριση Ορθοδρομίας, Λοξοδρομίας από σημείο Α στο Β

Ένας καλός τρόπος πλοήγησης είναι να χρησιμοποιούμε έναν συνδυασμό μεταξύ της λοξοδρομίας και της ορθοδρομίας. Με την επιλογή μερικών σημείων κατά μήκος της διαδρομής της λοξοδρομίας, ο πλοίαρχος μπορεί να χρησιμοποιήσει την λοξοδρομία μεταξύ των σημείων αυτών και να αλλάξει την πορεία του πλοίου μόνο λίγες φορές κατά τη διάρκεια του ταξιδιού.

Ως αζιμούθιο ορίζεται η γωνία μεταξύ του βορρά και της πορείας του σκάφους. Ο πραγματικός Βορράς (True North) έχει αζιμούθιο  $0^\circ$  και οι τιμές του αυξάνουν κατά τη φορά του ρολογιού, όπως φαίνεται στο Σχ. 6.7. Η γωνία του αζιμούθιου είναι σημαντική ώστε να βρούμε την σχετική πορεία μεταξύ του σκάφους, των κυμάτων και της κατεύθυνσης του ανέμου. Αυτό περιγράφεται στην παράγραφο 6.2.4.



Σχήμα 6.7 Γωνία αζιμούθιου

## 6.2.2 Σχεδιασμός κόμβων

Προκειμένου να εκτελέσουμε τον αλγόριθμο της βελτιστοποίησης πρέπει να ορίσουμε ένα πλέγμα με κόμβους. Σε αυτή την εργασία, ο σχεδιασμός του δικτύου είναι εμπνευσμένος από μια μέθοδο που παρουσιάστηκε από τον Lee et al. (2002). Η εφικτή περιοχή για το σκάφος θα καθοριστεί μέσω της ορθοδρομίας. Για να καθορίσουμε το σύνολο των κόμβων ακολουθούμε τα ακόλουθα βήματα:

### Αλγόριθμος 6.2. Αλγόριθμος σχεδιασμού κόμβων

**Βήμα 1:** Βρίσκουμε το κεντρικό σημείο κατά μήκος της διαδρομής της ορθοδρομίας,  $X_C$

**Βήμα 2:** Υπολογίζουμε την πορεία  $a$ , μεταξύ του κεντρικού σημείου και του σημείου πριν από το κεντρικό σημείο,  $X_{C-1}$ .

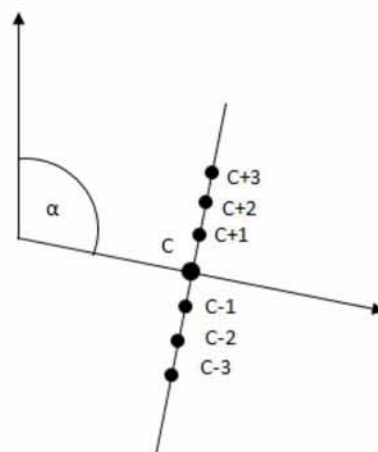
**Βήμα 3:** Ορίζουμε μια κάθετη γραμμή πάνω στο διάνυσμα της πορείας  $a$

**Βήμα 4:** Σχεδιάζουμε σημεία,  $C \pm i$ , πάνω στην κάθετο με μια επιλεγμένη απόσταση,  $\delta_i$ , μεταξύ των σημείων.

**Βήμα 5:** Υπολογίζουμε τις λοξοδρομίες μεταξύ του σημείου έναρξης και του τελικού σημείου για καθένα από τα κεντρικά σημεία

**Βήμα 6:** Ορίζουμε ένα σύνολο σημείων κατά μήκος της λοξοδρομίας.

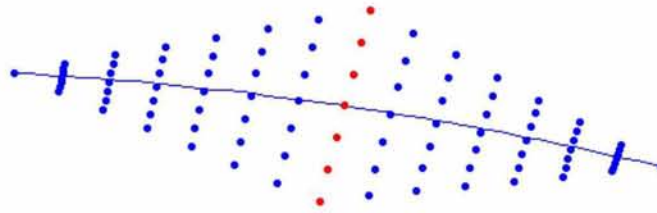
Το παρακάτω σχήμα ορίζει το σύνολο κεντρικών σημείων.



Σχήμα 6.8 Καθορισμός κεντρικών σημείων



Ένα παράδειγμα του πλέγματος δίνεται στο σχ. 6.9.

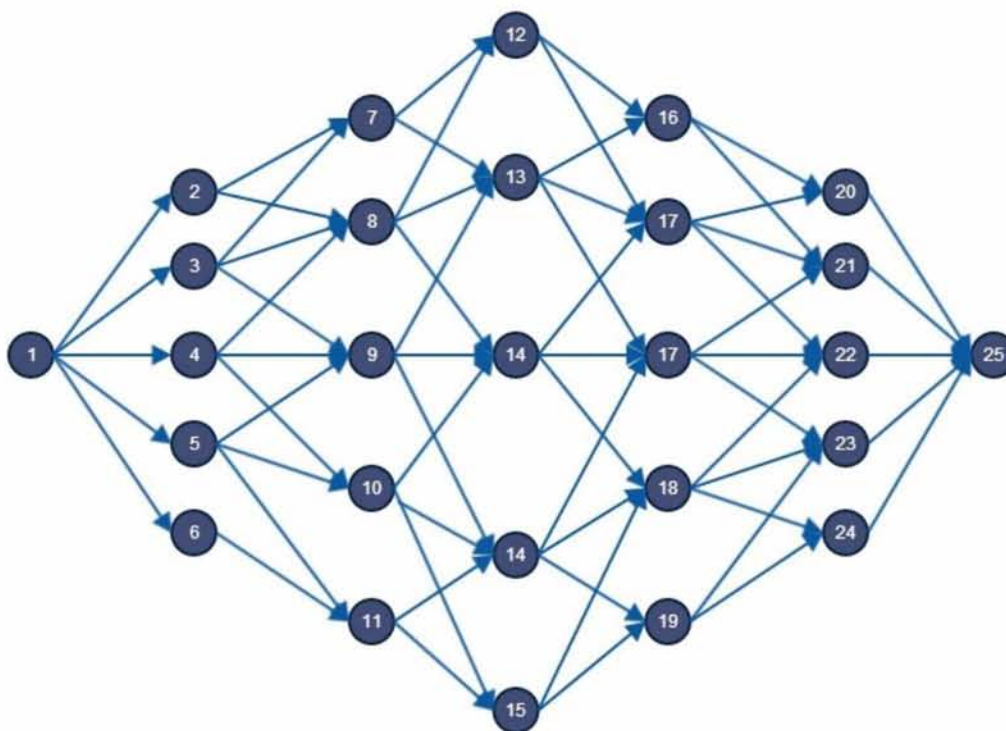


Σχήμα 6.9 Σχεδιασμός κόμβων, παράδειγμα πλέγματος

Η γραμμή αντιπροσωπεύει την ορθοδρομία, τα κόκκινα σημεία είναι τα κεντρικά σημεία και τα μπλε σημεία συνδέουν τα ακραία σημεία με τα κεντρικά σημεία. Η επιλεγμένη απόσταση μεταξύ των κεντρικών σημείων είναι  $1^\circ$ , και τα σημεία κατά μήκος της κάθε γραμμής είναι, επίσης, σε απόσταση μεταξύ τους  $1^\circ$ . Αυτό αντιστοιχεί σε περίπου 60 ναυτικά μίλια. Για το σκάφος που χρησιμοποιείται σε αυτήν τη βελτιστοποίηση η ταχύτητα θα είναι κανονικά μεταξύ 20 και 23 κόμβων, ανάλογα με την κατάσταση της θάλασσας, πράγμα που σημαίνει ότι ο πλοίαρχος του πλοίου, ενδεχομένως, θα αλλάζει την πορεία του πλοίου κάθε τρεις ώρες.

### 6.2.3 Καθορισμός τόξων

Προκειμένου να πλοηγηθούμε από τον κόμβο αναχώρηση στον κόμβο άφιξη θα πρέπει να καθορίσουμε τόξα μεταξύ των κόμβων. Ο καθορισμός των τόξων μεταξύ των κόμβων δίνει τη δυνατότητα περιορισμού του προβλήματος υποθέτοντας ότι μόνο ένας περιορισμένος αριθμός των κόμβων είναι προσπελάσιμος από έναν προεπιλεγμένο κόμβο. Ένα παράδειγμα κόμβων και τόξων δίνεται στο παρακάτω σχήμα. Σε αυτό το παράδειγμα έχουμε πέντε κεντρικά σημεία και επτά στάδια. Ένα στάδιο ορίζεται ως μια σειρά κόμβων η οποία έχει το ίδιο χρονικό βήμα.



Σχήμα 6.10 Δίκτυο δρομολόγησης

Σε αυτή την εργασία, τα τόξα χωρίζονται σε ευθεία τόξα, δεξιά τόξα και αριστερά τόξα. Αυτό σημαίνει ότι για έναν κόμβο μέσα στο δίκτυο, δηλαδή εκτός από το κόμβο έναρξης και λήξης, έχουμε τη δυνατότητα να πάμε σε δύο ή τρεις διαφορετικούς κόμβους. Για παράδειγμα, από τον κόμβο 4 μπορούμε να πάμε στους κόμβους 8, 9 και 10. Κατά την αξιολόγηση των παραπάνω εικόνων μπορεί να φαίνεται περισσότερο σκόπιμο να ορίσουμε τα τόξα ως βόρεια, νότια ή ίσια, αφού αναφερόμαστε σε πραγματικές γεωγραφικές συντεταγμένες. Ωστόσο, το δίκτυο μπορεί να συσταθεί για ταξίδια πηγαίνοντας ανατολικά, δυτικά, βόρεια και νότια, ώστε οι πραγματικές κατευθύνσεις θα διαφέρουν για κάθε δίκτυο. Για να είναι χρηστικά τα δεξιά και αριστερά τόξα το γράφημα θα πρέπει να σχεδιαστεί με τον κόμβο αναχώρησης στην κορυφή, και τον κόμβος άφιξης στο κάτω μέρος του γραφήματος.

Το δίκτυο έχει στηθεί έτσι ώστε να περιοριστεί το πρόβλημα. Όταν ένας κόμβος μπορεί να φτάσει μόνο δύο ή τρεις άλλους κόμβους ο χρόνος υπολογισμού είναι περιορισμένος. Μπορούμε ακόμα να υποθέσουμε ότι ένα δίκτυο με ποίο απομακρυσμένους κόμβους δεν θα μας δώσει και καλύτερη λύση στο πρόβλημα, δεδομένου ότι η γεωγραφική απόσταση είναι μεγάλη.

#### 6.2.4. Ανάθεση κόστους σε κάθε τόξο

Το κόστος για κάθε τόξο ορίζεται ως η κατανάλωση καυσίμου του πλοίου ώστε να ταξιδέψει από τον ένα κόμβο στον επόμενο. Η κατανάλωση καυσίμου για ένα δεδομένο τόξο μπορεί να βρεθεί από τον τύπο:

$$FC = b_s f_C \cdot P_B \cdot t \quad (6.2)$$

Όπου  $b_s f_C$  είναι η ειδική κατανάλωση καυσίμου πέδησης σε [g / kWh],  $P_B$  είναι η δύναμη πέδησης και  $t$  είναι ο χρόνος σε ώρες που χρειάζεται το πλοίο ώστε να πλεύσει ανάμεσα σε δύο κόμβους. Η δύναμη πέδησης διατηρείται σταθερή. Η μεταβλητή  $b_s f_C$  είναι επίσης σταθερή, έτσι το μόνο άγνωστο στην εξίσωση είναι ο χρόνος  $t$ . Για να βρούμε τον χρόνο  $t$  θα πρέπει να γνωρίζουμε το μήκος του τόξου και την εφικτή ταχύτητα του σκάφους. Ο χρόνος  $t$  δίνεται από τον τύπο:

$$t = \frac{d}{V} \quad (6.3)$$

Όπου  $d$  είναι το μήκος της ορθοδρομικής γραμμής. Σύμφωνα με τον Bowditch (2002) η απόσταση  $d$  ορίζεται ως:

$$d = \cos^{-1}(\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \Delta\lambda) \cdot R \quad (6.4)$$

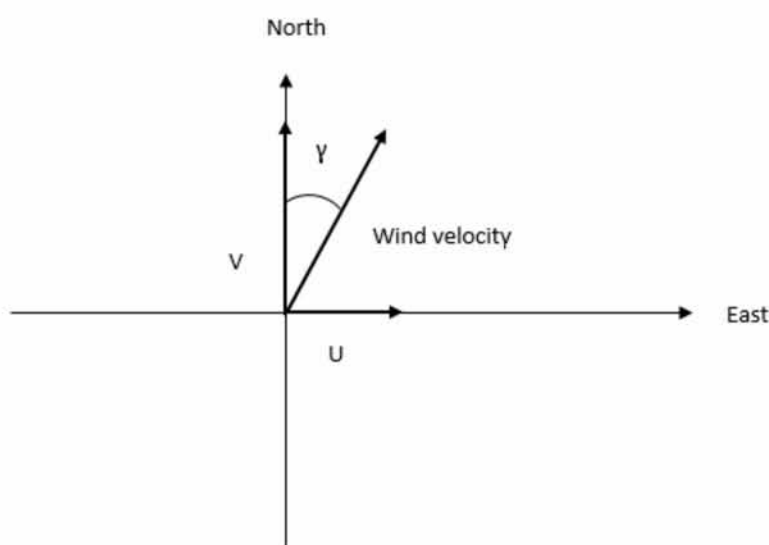
Όπου  $\varphi_1$  και  $\varphi_2$  είναι τα σημεία γεωγραφικού πλάτους αναχώρησης και άφιξης,  $\Delta\lambda$  είναι η διαφορά μήκους μεταξύ των δύο σημείων και  $R$  η ακτίνα της γης ( $R \approx 6.371Km$ ). Ακόμα κι αν οι κόμβοι στο δίκτυο ορίζονται σύμφωνα με την λοξοδρομία, η απόσταση του πλοίου στην πραγματικότητα είναι η ορθοδρομική απόσταση. Ως εκ τούτου, ο υπολογισμός του χρόνου που χρειάζεται για να ταξιδέψει το σκάφος μεταξύ των κόμβων πραγματοποιείται με την χρήση της ορθοδρομικής γραμμής. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι όταν η δύναμη πέδησης  $i$  διατηρείται σταθερή και η μόνη παράμετρος που αλλάζει είναι ο χρόνος, μπορούμε να υποθέσουμε ότι αυτή η μέθοδος μπορεί να επίσης να θεωρηθεί ως μία μέθοδος δρομολόγησης ελάχιστου χρόνου.

Για να βρούμε την εφικτή ταχύτητα του σκάφους θα πρέπει να γνωρίζουμε τη συνολική αντίσταση του πλοίου σε ήρεμα νερά, τον άνεμο και τα κύματα. Η συνολική αντίσταση μπορεί να βρεθεί γνωρίζοντας το σημαντικό ύψος κύματος, τη

μέση περίοδο του κύματος, την κατεύθυνση και ταχύτητα του ανέμου καθώς και την κατεύθυνση και την ταχύτητα του σκάφους. Η εύρεση της ταχύτητας είναι μια διαδικασία επανάληψης.

Υποθέτουμε την ταχύτητα μέχρι η συνολική αντίσταση, η ταχύτητα και η προωστική απόδοση να μας δώσουν την επιθυμητή ισχύ πέδησης.

Η ταχύτητα του ανέμου δίνεται ως U- και V-συνιστώσες του ανέμου στα 10 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η U-συνιστώσα δίνει την ταχύτητα του ανέμου στην x-κατεύθυνση, δηλαδή ανατολικά, και η V-συνιστώσα δίνει την ταχύτητα στην y-κατεύθυνση, δηλαδή βόρεια.



Σχήμα 6.11 Ανάλυση ανέμου σε συνιστώσες

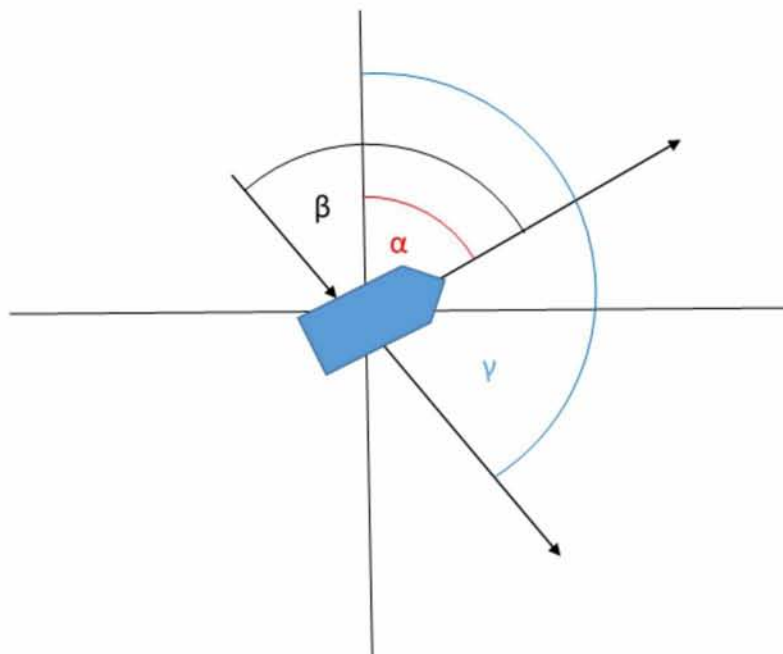
Η προκύπτουσα ταχύτητα του ανέμου και η γωνία είναι:

$$V_{\omega} = \sqrt{U^2 + V^2} \quad (6.5)$$

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{U}{V}\right) \quad (6.6)$$

Ωστόσο, για να βρούμε τη σχετική πορεία μεταξύ του πλοίου και του ανέμου, η γωνία θα πρέπει να οριστεί ως αζιμούθιο, φυσώντας σε μία κατεύθυνση μεταξύ 0° και 360°. Αυτό γίνεται απλά με την προσθήκη 90°, 180° και 270° στο γ, ανάλογα με το εάν U και V είναι θετικά ή αρνητικά. Όταν ο άνεμος φυσάει από δυτικά, το U έχει αρνητική τιμή, και όταν φυσάει από νότια έχει το V αρνητική τιμή.

Το επόμενο βήμα στην εύρεση της συνολικής αντίστασης είναι να υπολογιστεί η σχετική γωνία μεταξύ του πλοίου και του ανέμου. Ο γωνία του αζιμούθιου για τον άνεμο ορίζεται ως  $\gamma$ , η πορεία του σκάφους ορίζεται ως  $\alpha$  και η σχετική γωνία μεταξύ του πλοίου και του άνεμο και των κυμάτων ορίζεται ως  $\beta$ .



Σχήμα 6.12 Κατεύθυνση ανέμου-  $\beta_{wind}$

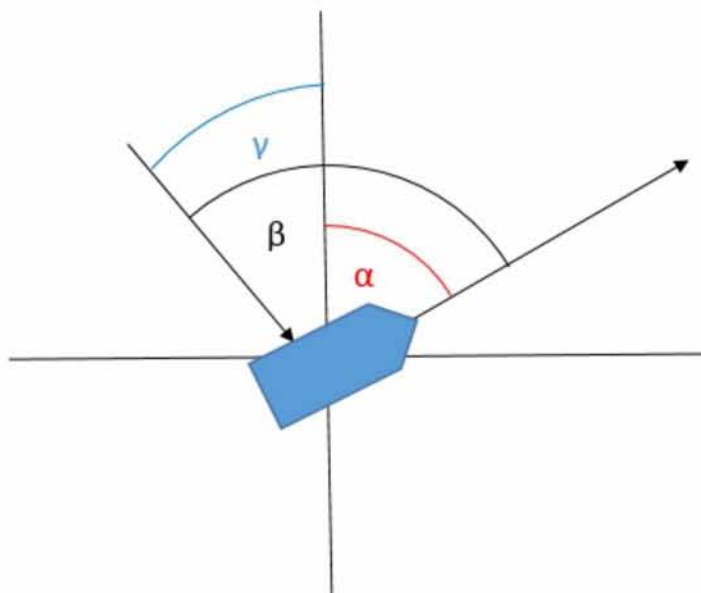
Όπως φαίνεται στο σχήμα Σχ. 6.12, το  $\beta$  συναντά το πλοίο υπό γωνία  $\gamma - 180^\circ$ .

Στην παρακάτω εξίσωση παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού της σχετικής πορείας του ανέμου.

$$\beta_{wind} = \begin{cases} |\gamma - \alpha| & \text{αν } 0^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ \\ |\gamma - \alpha - 180^\circ| & \text{αν } 180^\circ < \gamma < 360^\circ \end{cases} \quad (6.7)$$

Η σχετική πορεία του ανέμου μεταβάλλει τον συντελεστή της οπισθέλκουσας, και την προστιθέμενη αντίσταση λόγω του ανέμου μπορούμε να την υπολογίσουμε χρησιμοποιώντας την εξίσωση 5.56.

Η μέση πορεία του κύματος στην πρόγνωση του καιρού ορίζεται ως όπου έρχεται το κύμα. Αυτό σημαίνει ότι το κύμα συναντά το σκάφος όπως στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.13 Κατεύθυνση κύματος-  $\beta_{wave}$

Η κατεύθυνση του κύματος  $\beta_{wave}$  μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$\beta_{wave} = \sqrt{\alpha^2 + \gamma^2 - 2\alpha\gamma}$$

(6.8)

Γνωρίζοντας την σχετική πορεία του κύματος, το σημαντικό ύψος κύματος και τη μέση περίοδο, μπορούμε να υπολογίσουμε τη μέση προστιθέμενη αντίσταση για κάθε τόξο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο που περιγράφεται στο κεφάλαιο 2. Έχοντας πραγματοποιήσει τους παραπάνω υπολογισμούς μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα του πλοίου για τη δεδομένη κατάσταση της θάλασσας και να αναθέσουμε σε κάθε τόξο το κόστος του.

Εκτός από την προστιθέμενη αντίσταση, σε αυτή την εργασία προτείνουμε και μια μέθοδο ώστε να αποφύγουμε καταστάσεις της θαλάσσης που οδηγούν σε μεγάλες αποκρίσεις του σκάφους. Οι seakeeping υπολογισμοί που εκτελούνται λαμβάνουν υπόψη την περιστροφή του πλοίου, την σχετική κατακόρυφη επιτάχυνση, την υγρασία του καταστρώματος και το slamming για κάθε τόξο. Αν το κόστος του τόξου υπερβαίνει κάποιο από τα κριτήρια seakeeping, το κόστος για το δεδομένο τόξο ορίζεται στους 1.000 τόνους καυσίμου. Αυτό σημαίνει ότι αυτό το τόξο είναι πολύ ακριβό και δεν θα επιλεγεί από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης.

## 7. Υλοποίηση

Σε αυτή την φάση παρουσιάζουμε την δημιουργία του προγράμματος χάραξης της βέλτιστης διαδρομής ενός πλοίου.

Στο συγκεκριμένο πρόγραμμα δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει ανάμεσα σε τρεις επιλογές αναζήτησης της βέλτιστης πορείας:

- 1) Με Ορθοδρομική πλεύση
- 2) Με Λοξοδρομική πλεύση
- 3) Με Λοξοδρομική πλεύση συνυπολογίζοντας τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες.

Στο παρόν κεφάλαιο χρησιμοποιούμε την μοντελοποίηση του πλοίου που έχουμε παρουσιάσει στο Κεφ.5 σχετικά με τις διαστάσεις και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του.

Στις δύο πρώτες περιπτώσεις το ζητούμενο είναι η εύρεση της συνολικής διανυόμενης απόστασης και των ενδιάμεσων σημείων από τα οποία θα διέλθει το σκάφος μιας και η ταχύτητα θεωρείται σταθερή. Στην τελευταία περίπτωση, όπως αναφέραμε και στο 6<sup>ο</sup> Κεφ. η απόσταση μεταξύ των κόμβων είναι δεδομένη και το ζητούμενο είναι η ταχύτητα του πλοίου βάση των καιρικών συνθηκών.

Ως σημείο αναχώρησης ορίζουμε το λιμάνι της Βοστώνης και συγκεκριμένα το Conley Container Terminal με συντεταγμένες (42.33797, -71.02669) και σημείο άφιξης το λιμάνι της Λισσαβόνας και συγκεκριμένα το Administração do Porto de Lisboa με συντεταγμένες (38.69925, -9.17445).



## 7.1 Ορθοδρομική πλεύση

Ορθοδρομική πλεύση ή ορθοδρομικός πλους ή απλούστερα Ορθοδρομία (spherical sailing, ή great circle sailing). Όπως αναφέραμε και προηγουμένους, ως ορθοδρομία χαρακτηρίζεται ο πλους εκείνος που πραγματοποιείται σε τόξο μικρότερο των  $180^\circ$  επί του μεγίστου κύκλου (της επιφάνειας της Γης - θάλασσας) που ενώνει δύο τόπους, και που τελικά είναι η μικρότερη μεταξύ αυτών των τόπων απόσταση. Όπως είναι γνωστό από τη Στερεομετρία, τόξο μεγίστου κύκλου μεταξύ δύο σημείων της επιφάνειας μιας σφαίρας είναι η συντομότερη απόσταση μεταξύ των σημείων αυτών. Έτσι το είδος αυτό της πλεύσης επειδή συμβαίνει επί μεγίστου κύκλου καλείται και "πλους μεγίστου κύκλου". Το δε μέτρο του ορθοδρομικού τόξου εκφρασμένο σε πρώτα της μοίρας αποδίδει ακριβώς την απόσταση σε ναυτικά μίλια.

Το χαρακτηριστικό της ορθοδρομίας είναι ότι αυτή στρέφει το κυρτό της προς τους πόλους, και το κοίλο της προς τον ισημερινό ενώ τέμνει τους μεσημβρινούς υπό διαφορετικές γωνίες, αφού οι μεσημβρινοί της Γης δεν είναι παράλληλοι, αλλά συγκλίνοντας τέμνονται στους Πόλους.

- Η Ορθοδρομία στο Μερκατορικό χάρτη παρίσταται ως καμπύλη γραμμή, με το κυρτό της στραμμένο προς τους Πόλους. Συνεπώς τέμνει τους (παράλληλους) μεσημβρινούς υπό διαφορετική γωνία, από σημείου αναχώρησης μέχρι σημείου άφιξης, σε αντίθεση της Λοξοδρομίας που παρίσταται σε ίδιο ναυτικό χάρτη ως ευθεία.
- Η Ορθοδρομική πλεύση έχει το σημαντικό πλεονέκτημα της διάνυσης της συντομότερης απόστασης από τόπο εκκίνησης στο τόπο άφιξης, αλλά συγχρόνως και το μειονέκτημα της συνεχούς αλλαγής της πορείας σε τακτά χρονικά διαστήματα.
- Για μικρές αποστάσεις, η διαφορά μεταξύ Ορθοδρομίας και Λοξοδρομίας είναι αμελητέα. Έτσι αφού το κέρδος δεν είναι ουσιώδες προτιμάται η λοξοδρομική πλεύση με το πλεονέκτημα της διατήρησης σταθερής πορείας. Συνήθως για τα μέσα γεωγραφικά πλάτη μέχρι  $600$  ν.μ. η πλεύση είναι πάντα λοξοδρομική.
- Η Ορθοδρομία και η Λοξοδρομία συμπίπτουν στη περίπτωση πλόων επί του Ισημερινού, καθώς και επί των μεσημβρινών, δηλαδή για πορείες  $000^\circ$  ή  $180^\circ$  για τη δεύτερη περίπτωση. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια σε πλόες που ο τόπος προορισμού έχει μικρή "διαφορά γεωγραφικού μήκους", Δλ, (δείτε σχετικά 2ο υπολογισμό στο γεωγραφικό σίγμα) και ανεξάρτητα του γεωγραφικού πλάτους ακολουθείται η λοξοδρομία. Σε πορείες πλοίων προς Απηλιώτη (A) ή προς Ζέφυρο (Z) παρατηρείται η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ Λοξοδρομίας και Ορθοδρομίας. Η διαφορά αυτή αυξάνει σημαντικά με την



αύξηση του γεωγραφικού πλάτους. Έτσι όταν οι δύο τόποι αναχώρησης και προορισμού βρίσκονται πλησίον του Ισημερινού αυτή να είναι αμελητέα.

Επισημαίνεται ότι οι ορθοδρομικές πλεύσεις διέρχονται από υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη με συνέπεια πολλές φορές να εγκυμονούνται κίνδυνοι στην ασφάλεια του πλου (π.χ. ομίχλες, παγόβουνα, τρικυμία κ.λπ).

Επίσης η επιλογή της ορθοδρομίας ή λοξοδρομίας σε συγκεκριμένο πλου μεγαλύτερης απόστασης των 600 ναυτικών μιλίων, πολλές φορές δεν είναι και εύκολη υπόθεση, διότι μπορεί μεν ν' αποτελεί, εκ της σύγκρισης, η διαφορά των δύο αποστάσεων, βασικό παράγοντα επιλογής, πλην όμως η ασφάλεια του πλου και η συντόμευση αυτού εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, π.χ. πρόβλεψη καιρού, κατάσταση θαλάσσης, ύπαρξη τυφώνων, κ.λπ. που θα πρέπει να μελετώνται με προσοχή σ' αμφότερα τα είδη πλεύσης προκειμένου ν' ακολουθήσει η τελική απόφαση επιλογής πλου.

### 7.1.1 Παρουσίαση υπολογισμών Ορθοδρομικής πλεύσης

#### 7.1.1.1 Απόσταση στην Ορθοδρομία

Ο παρακάτω τύπος μας δίνει την απόσταση μεταξύ δύο σημείων όταν ακολουθούμε πορεία μεγάλων κύκλων, ορθοδρομία.

Law of cosines:  $d = \text{acos}(\sin \phi_1 \cdot \sin \phi_2 + \cos \phi_1 \cdot \cos \phi_2 \cdot \cos \Delta\lambda) \cdot R$

JavaScript:

```
var φ1 = lat1.toRadians(), φ2 = lat2.toRadians(), Δλ = (lon2-lon1).toRadians(),
```

```
R = 6371e3;
```

```
// Δίνει την απόσταση σε μέτρα.
```

```
vard=Math.acos(Math.sin(φ1)*Math.sin(φ2)+Math.cos(φ1)*Math.cos(φ2)*Math.  
cos(Δλ))*R;
```

Για το παράδειγμα στην παρούσα εργασία η απόσταση υπολογίζεται στα 5128 Km

#### 7.1.1.2 Διόπτευση

Καθώς το πλοίο θα ακολουθεί μια διαδρομή μεγάλου κύκλου, ορθοδρομία, η τελική διόπτευση θα διαφέρει από την αρχική κατά διάφορους βαθμούς ανάλογα με την απόσταση και το γεωγραφικό πλάτος

Ο παρακάτω τύπος υπολογίζει την αρχική διόπτευση (μερικές φορές αναφέρεται ως προς τα εμπρός αζιμούθιο), η οποία, εάν ακολουθείται σε ευθεία

γραμμή κατά μήκος ενός τόξου μεγάλου κύκλου θα μας μεταφέρει από το σημείο εκκίνησης στο σημείο τερματισμού:

Τύπος:  $\theta = \text{atan2}(\sin \Delta\lambda \cdot \cos \phi_2, \cos \phi_1 \cdot \sin \phi_2 - \sin \phi_1 \cdot \cos \phi_2 \cdot \cos \Delta\lambda)$

όπου  $\phi_1, \lambda_1$  είναι το σημείο εκκίνησης,  $\phi_2, \lambda_2$  το τελικό σημείο ( $\Delta\lambda$  είναι η διαφορά στο μήκος)

JavaScript:

(Όλες οι γωνίες σε ακτίνια)

```
var y = Math.sin( $\lambda_2 - \lambda_1$ ) * Math.cos( $\phi_2$ );
```

```
var x = Math.cos( $\phi_1$ ) * Math.sin( $\phi_2$ ) - Math.sin( $\phi_1$ ) * Math.cos( $\phi_2$ ) * Math.cos( $\lambda_2 - \lambda_1$ );
```

```
var brng = Math.atan2(y, x).toDegrees();
```

Επειδή το `atan2` επιστρέφει τιμές στο εύρος  $-\pi \dots + \pi$  (δηλαδή,  $-180^\circ \dots + 180^\circ$  C), για να εξομαλύνουμε το αποτέλεσμα για να μπορέσουμε να το χρησιμοποιήσουμε σε μία απλή πυξίδα (εύρος  $0^\circ \dots 360^\circ$ , οι αρνητικές τιμές θα πρέπει να μετατραπούν σε εύρος  $180^\circ \dots 360^\circ$ ), μετατρέπουμε τα ακτίνια σε μοίρες και στη συνέχεια χρησιμοποιούμε τον τύπο  $(\theta + 360) \% 360$ , όπου  $\%$  είναι (floating point) modulo.

Για το παράδειγμα στην παρούσα εργασία ως αρχική διόπτρευση υπολογίζεται η  $072^\circ 42' 36''$  και ως τελική η  $115^\circ 15' 55''$

### 7.1.1.3 Ενδιάμεσο σημείο

Ο παρακάτω τύπος μας δίνει τις συντεταγμένες του ενδιάμεσου σημείου κατά την ορθοδρομία μεταξύ δύο σημείων.

Τύπος:

$$B_x = \cos \phi_2 \cdot \cos \Delta\lambda$$
$$B_y = \cos \phi_2 \cdot \sin \Delta\lambda$$
$$\phi_m = \text{atan2}(\sin \phi_1 + \sin \phi_2, \sqrt{(\cos \phi_1 + B_x)^2 + B_y^2})$$
$$\lambda_m = \lambda_1 + \text{atan2}(B_y, \cos(\phi_1) + B_x)$$

JavaScript:

(all angles in radians)

```
var B_x = Math.cos( $\phi_2$ ) * Math.cos( $\lambda_2 - \lambda_1$ );
```

```

var By = Math.cos(φ2) * Math.sin(λ2-λ1);

var φ3 = Math.atan2(Math.sin(φ1) + Math.sin(φ2),

    Math.sqrt( (Math.cos(φ1)+Bx)*(Math.cos(φ1)+Bx) + By*By ) );

var λ3 = λ1 + Math.atan2(By, Math.cos(φ1) + Bx);

```

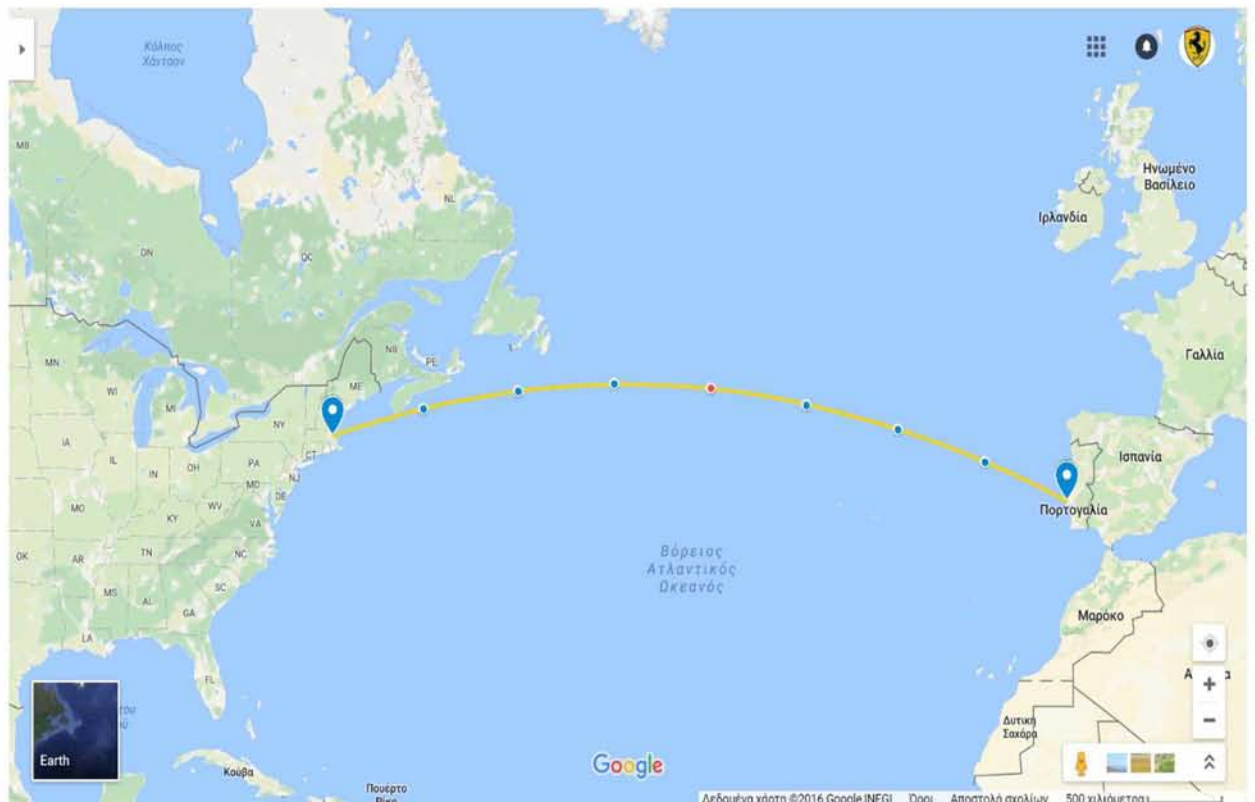
Το γεωγραφικό μήκος μπορεί να κανονικοποιηθεί σε  $-180...+180$  με την χρήση του τύπου  $(lon+540)\%360-180$

Επειδή η αρχική πορεία του πλοίου διαφέρει από την τελική, το ενδιάμεσο σημείο μπορεί να μην είναι τοποθετημένο ακριβώς στη μέση του γεωγραφικού μήκους/πλάτους.

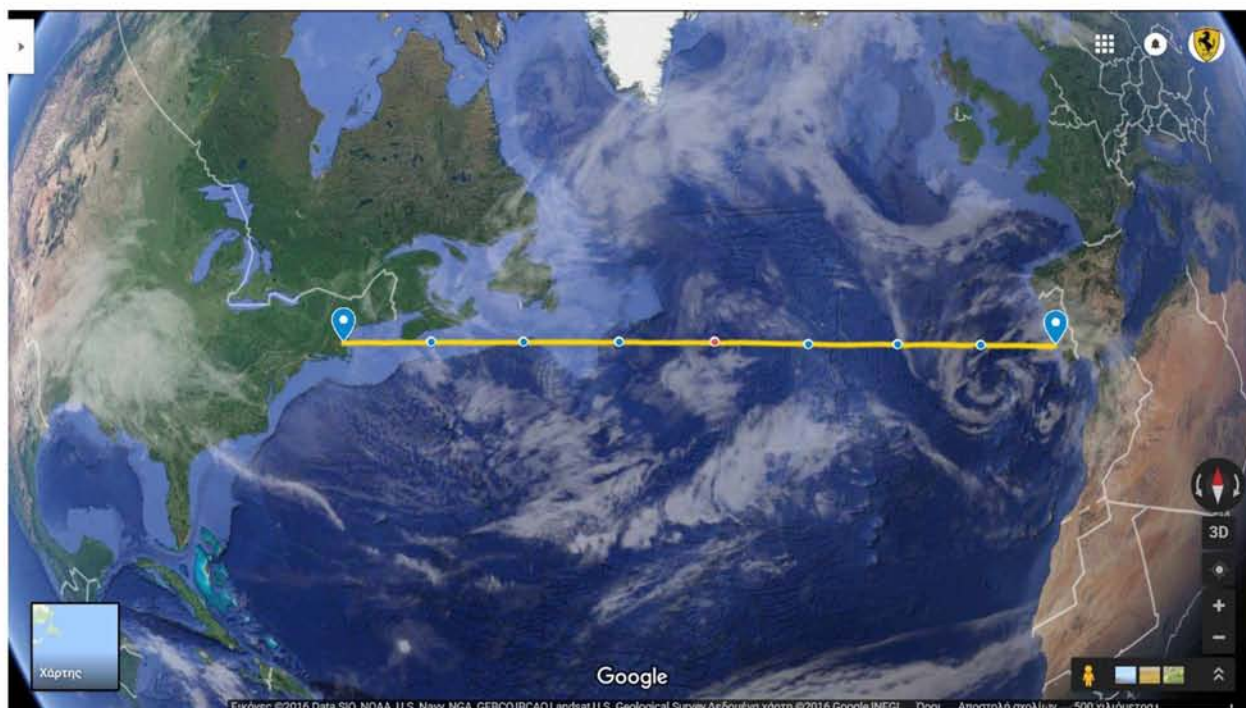
Για το παράδειγμα στην παρούσα εργασία ως ενδιάμεσο σημείο προκύπτει το  $44^{\circ} 53' 22'' N$ ,  $039^{\circ} 10' 08'' W$  (στον χάρτη που ακολουθεί εμφανίζεται με κόκκινο χρώμα)

Για τον υπολογισμό των συντεταγμένων των υπολοίπων σημείων της διαδρομής επαναλαμβάνουμε την διαδικασία εύρεσης ενδιάμεσου σημείου μεταξύ ενδιάμεσων σημείων.

### Επίπεδη απεικόνιση



## Σφαιρική απεικόνιση



### 7.2 Λοξοδρομική πλεύση

Με τον ναυτικό όρο λοξοδρομική πλεύση ή λοξοδρομικός πλους ή απλούστερα Λοξοδρομία (plain sailing ή Mercator sailing ή Rhumb line)\* χαρακτηρίζεται αφενός μεν ο πλους εκείνος που πραγματοποιεί ένα πλοίο από ένα σημείο της Γης σε άλλο, πλέοντας με σταθερή πορεία ακολουθώντας έτσι μια καμπύλη, καλούμενη λοξοδρομική καμπύλη, που τέμνει τους μεσημβρινούς υπό σταθερή γωνία, αφετέρου η κατ' ενάντια του ανέμου πλεύση κυρίως ιστιοφόρου που ακολουθεί πορεία τεθλασμένης γραμμής κοινώς λεγόμενη "με βόλτες" ή "με λούγκα βόλτες" ή και παλαιότερα λεγόμενη "τόκα-μπουρίνα" που πολλοί εν προκειμένω την χαρακτηρίζουν επίσημα ως πλαγιοδρομία (μόνο για ιστιοφόρα).

(\*) Εκτός των Άγγλων οι περισσότεροι ναυτικοί λαοί χρησιμοποιούν τον ελληνικό όρο "Loxodromes".

Θεωρητικά η λοξοδρομία ανερχόμενη σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη σχηματίζει σπείρα που ουδέποτε όμως φθάνει στους Πόλους, αφού παραμένει ασύμπτωτη. Γενικά από δύο σημεία της επιφάνειας της Γης διέρχονται άπειρες λοξοδρομίες εκείνη όμως που ενδιαφέρει την ναυσιπλοΐα είναι εκείνη που ενώνει απ' ευθείας τα δύο συγκεκριμένα σημεία χωρίς να περιστρέφεται περί τη Γη.

Οι αποστάσεις επί της λοξοδρομικής καμπύλης ονομάζονται λοξοδρομικές αποστάσεις.

Η Λοξοδρομία και η Ορθοδρομία αποτελούν τα δύο κύρια και βασικά είδη πλεύσεων των πλοίων ειδικά σε μεγάλες αποστάσεις.

- Η Λοξοδρομία στο Μερκατορικό χάρτη παρίσταται ως ευθεία γραμμή, εφόσον τέμνει τους (παράλληλους) μεσημβρινούς υπό την αυτή γωνία, από σημείου αναχώρησης μέχρι σημείου άφιξης, σε αντίθεση της Ορθοδρομίας που παρίσταται σε ίδιο ναυτικό χάρτη ως καμπύλη.
- Η Λοξοδρομική πλεύση έχει το σημαντικό πλεονέκτημα της τήρησης σταθερής πορείας από τόπο εκκίνησης στο τόπο άφιξης, αλλά συγχρόνως και το μειονέκτημα της διανύσεως μεγαλύτερης απόστασης.
- Για μικρές αποστάσεις, η διαφορά μεταξύ Λοξοδρομίας και Ορθοδρομίας είναι αμελητέα. Έτσι αφού το κέρδος δεν είναι ουσιώδες προτιμάται η λοξοδρομική πλεύση με το πλεονέκτημα της διατήρησης σταθερής πορείας. Συνήθως για τα μέσα γεωγραφικά πλάτη μέχρι 600 ν.μ. η πλεύση είναι πάντα λοξοδρομική.
- Η Ορθοδρομία και η Λοξοδρομία συμπίπτουν στη περίπτωση πλόων επί του Ισημερινού, καθώς και επί των μεσημβρινών, δηλαδή για πορείες 000° ή 180° για τη δεύτερη περίπτωση. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια σε πλόες που ο τόπος προορισμού έχει μικρή "διαφορά γεωγραφικού μήκους", Δλ, (δείτε σχετικά 2ο υπολογισμό στο γεωγραφικό στίγμα) και ανεξάρτητα του γεωγραφικού πλάτους ακολουθείται η λοξοδρομία. Σε πορείες πλοίων προς Απηλιώτη (Α) ή προς Ζέφυρο (Δ) παρατηρείται η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ Λοξοδρομίας και Ορθοδρομίας. Η διαφορά αυτή αυξάνει σημαντικά με την αύξηση του γεωγραφικού πλάτους. Έτσι όταν οι δύο τόποι αναχώρησης και προορισμού βρίσκονται πλησίον του Ισημερινού αυτή να είναι αμελητέα.

Αν και ο όρος λοξοδρομία είναι ελληνικός, εντούτοις δεν καθιερώθηκε από τους Έλληνες αλλά από τον Πορτογάλο γεωμέτρη Πέντρο Νιούνι (ή Νούνιος) που σχημάτισε αυτόν από τις ελληνικές λέξεις λοξός και δρόμος. Και τούτο το προσδιόρισε εξ ανάγκης για τους μακρινούς πλόες, τους λεγόμενους "λούγκο κόρσο".

### 7.2.1 Παρουσίαση υπολογισμών Λοξοδρομικής πλεύσης

Κλειδί για τους υπολογισμούς κατά την Λοξοδρομική πλεύση μεταξύ δυο σημείων που ενώνουν είναι η αντίστροφη συνάρτηση του Gudermannian, η οποία δίνει το ύψος σε ένα χάρτη προβολής Mercator ενός δεδομένου γεωγραφικού πλάτους  $\phi$ :  $\ln(\tan\phi + \sec\phi)$  ή  $\ln(\tan(\pi/4 + \phi/2))$ . Αυτό βέβαια τείνει στο άπειρο στους πόλους (σύμφωνα με την προβολή Mercator). Για μεγαλύτερη ακρίβεια, υπάρχει ακόμη και μια ελλειψοειδή έκδοση, η «ισομετρική γεωγραφικού πλάτους»:  $\psi = \ln(\tan(\pi/4 + \phi/2) / [(1 - e \cdot \sin\phi) / (1 + e \cdot \sin\phi)] \varepsilon / 2)$ , ή ένα ακόμα καλύτερο υπό συνθήκη ισοδύναμο:  $\psi = \operatorname{atanh}(\sin\phi) - e \cdot \operatorname{atanh}(e \cdot \sin\phi)$ .

Ο τύπος για την μετατροπή του σφαιρικού γεωγραφικού πλάτους και μήκους σε συντεταγμένες ενός χάρτη προβολής Mercator είναι

$$E = R \cdot \lambda$$

$$N = R \cdot \ln(\tan(\pi/4 + \phi/2))$$

### 7.2.1.1 Απόσταση στην Λοξοδρομία

Σύμφωνα με τον λοξοδρομικό πλου, η πορεία που ακολουθεί ένα πλοίο για να μεταβεί από το σημείο αναχώρησης στο σημείο άφιξης απεικονίζεται πάνω στον επίπεδο χάρτη προβολής ως μία ευθεία γραμμή που ενώνει τα δύο σημεία. Η απόσταση μεταξύ δύο σημείων κατά μήκος της λοξής γραμμής είναι το μήκος της γραμμής που μπορούμε να την υπολογίσουμε με τη χρήση του Πυθαγορείου Θεωρήματος. Θα πρέπει όμως να συνυπολογίσουμε και την στρέβλωση της προβολής η οποία θα πρέπει να αντισταθμιστεί.

Σε μια σταθερή γεωγραφικού πλάτους πορεία, όπου το πλοίο ταξιδεύει από Δυτικά προς τα Ανατολικά, όπως στο παράδειγμά μας, η αποζημίωση αυτή είναι απλά συνφ. Στη γενική περίπτωση, είναι  $\Delta\phi / \Delta\psi$  όπου  $\Delta\psi = \ln(\tan(\pi/4 + \phi_2/2) / \tan(\pi/4 + \phi_1/2))$  (η «προβλεπόμενη» διαφορά γεωγραφικού πλάτους)

Τύπος:

$\Delta\psi = \ln(\tan(\pi/4 + \phi_2/2) / \tan(\pi/4 + \phi_1/2))$  («προβολική» διαφορά γεωγραφικού πλάτους)

$q = \Delta\phi / \Delta\psi$  (ή συνφ για την Α-Δ γραμμή)

$$d = \sqrt{(\Delta\phi^2 + q^2 \cdot \Delta\lambda^2)} \cdot R \text{ (Πυθαγόρειο Θεώρημα)}$$

όπου  $\phi$  είναι το γεωγραφικό πλάτος,  $\lambda$  είναι το γεωγραφικό μήκος, ως  $\Delta\lambda$  λαμβάνουμε την συντομότερη διαδρομή ( $<180^\circ$ ), το  $R$  είναι η ακτίνα της Γης,  $\ln$  είναι ο φυσικός λογάριθμος.

JavaScript:

(Όλες οι γωνίες σε ακτίνια)

```
var Δψ = Math.log(Math.tan(Math.PI/4 + φ2/2)/Math.tan(Math.PI/4 + φ1/2));
```

```
var q = Math.abs(Δψ) > 10e-12; Δφ / Δψ: Math.cos(φ1);
```

```
// Αν dLon πάνω από 180 ° λάβουν μικρότερη γραμμή που ενώνουν όλη την αντι-  
μεσημβρινό:
```

```
if (Math.abs(Δλ) > Math.PI) Δλ = Δλ > 0 ? -(2*Math.PI-Δλ) : (2*Math.PI+Δλ);
```

```
var dist = Math.sqrt(Δφ*Δφ + ρ*ρ*Δλ*Δλ) * R;
```

Για το παράδειγμα στην παρούσα εργασία η απόσταση υπολογίζεται στα 5242 Km

### 7.2.1.2 Διόπτευση

Μια λοξοδρομική γραμμή που ενώνει δυο κόμβους είναι μια ευθεία γραμμή πάνω σε ένα χάρτη προβολής Mercator, με μια γωνία στην προβολή ίση με τη φέρουσα πυξίδα.

Τύπος:

$\Delta\psi = \ln(\tan(\pi/4 + \phi/2) / \tan(\pi/4 + \phi_1/2))$  («προβολική» διαφορά γεωγραφικού πλάτους)

$\theta = \text{atan2}(\Delta\lambda, \Delta\psi)$

όπου  $\phi$  είναι το γεωγραφικό πλάτος,  $\lambda$  είναι το γεωγραφικό μήκος, ως  $\Delta\lambda$  λαμβάνουμε την συντομότερη διαδρομή (<180 °),  $\ln$  είναι ο φυσικός λογάριθμος.

JavaScript:

(Όλες οι γωνίες σε ακτίνια)

```
var Δψ = Math.log(Math.tan(Math.PI/4+φ/2)/Math.tan(Math.PI/4+φ1/2));
```

```
// Αν dLon πάνω από 180 ° λάβουν μικρότερη γραμμή που ενώνουν όλη την αντι-  
μεσημβρινό:
```

```
if (Math.abs(Δλ) > Math.PI) Δλ = Δλ>0 ? -(2*Math.PI-Δλ) : (2*Math.PI+Δλ);
```

```
var brng = Math.atan2(Δλ, Δψ).toDegrees();
```

Για το παράδειγμα στην παρούσα εργασία η διόπτευση υπολογίζεται η 094° 25' 37"

### 7.2.1.3 Ενδιάμεσο σημείο

Ο παρακάτω τύπος μας δίνει τις συντεταγμένες του ενδιάμεσου σημείου κατά την λοξοδρομία μεταξύ δύο σημείων.

Τύπος:

$\phi_m = (\phi_1 + \phi_2) / 2$

$f_1 = \tan(\pi/4 + \phi_1/2)$

$f_2 = \tan(\pi/4 + \phi_2/2)$

$f_m = \tan(\pi/4 + \phi_m/2)$

$$\lambda_m = [ (\lambda_2 - \lambda_1) \cdot \ln(f_m) + \lambda_1 \cdot \ln(f_2) - \lambda_2 \cdot \ln(f_1) ] / \ln(f_2/f_1)$$

όπου  $\phi$  είναι το γεωγραφικό πλάτος,  $\lambda$  είναι το γεωγραφικό μήκος και  $\ln$  είναι ο φυσικός λογάριθμος.

JavaScript:

(Όλες οι γωνίες σε ακτίνια)

```
if (Math.abs( $\lambda_2 - \lambda_1$ ) > Math.PI)  $\lambda_1 += 2 * \text{Math.PI}$ ; // διέλευση αντι-μεσημβρινού
var  $\phi_3 = (\phi_1 + \phi_2) / 2$ ;
var  $f_1 = \text{Math.tan}(\text{Math.PI} / 4 + \phi_1 / 2)$ ;
var  $f_2 = \text{Math.tan}(\text{Math.PI} / 4 + \phi_2 / 2)$ ;
var  $f_3 = \text{Math.tan}(\text{Math.PI} / 4 + \phi_3 / 2)$ ;
var  $\lambda_3 = ( (\lambda_2 - \lambda_1) * \text{Math.log}(f_3) + \lambda_1 * \text{Math.log}(f_2) - \lambda_2 * \text{Math.log}(f_1) ) / \text{Math.log}(f_2 / f_1)$ ;
if (!isFinite( $\lambda_3$ ))  $\lambda_3 = (\lambda_1 + \lambda_2) / 2$ ; // γεωγραφικός παράλληλος
```

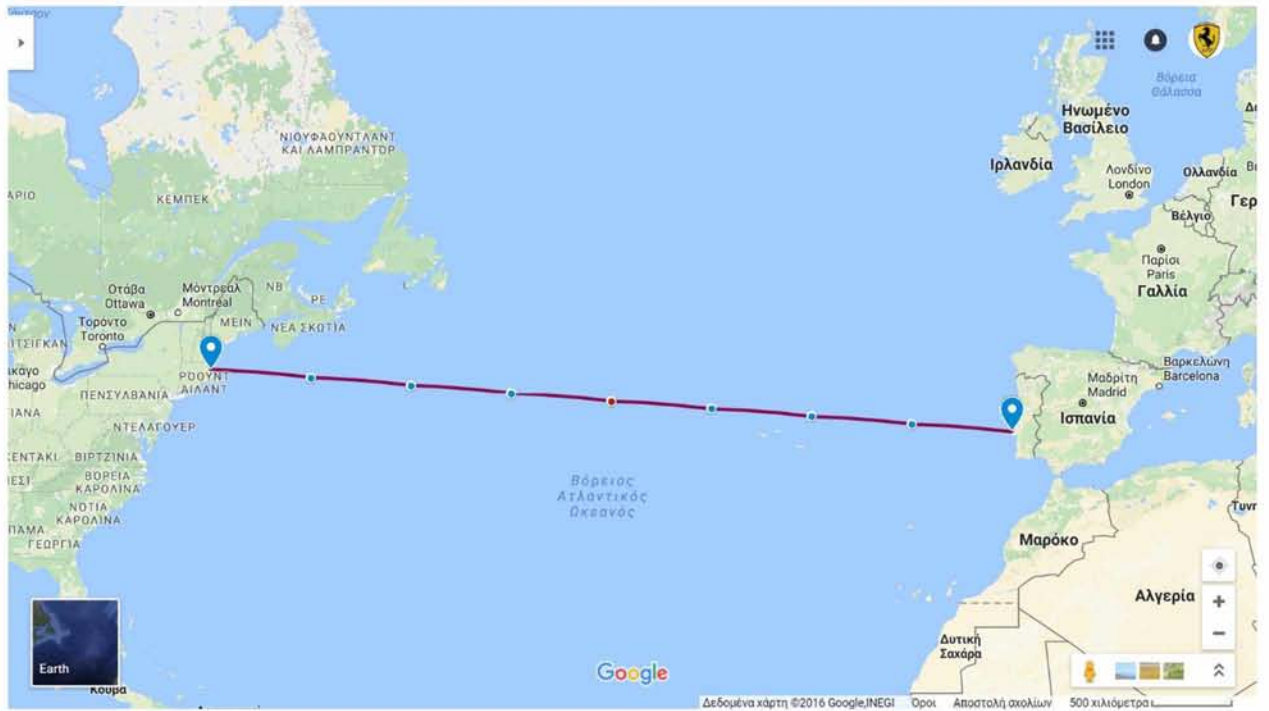
Το γεωγραφικό μήκος μπορεί να κανονικοποιηθεί σύμφωνα με  $-180 \dots +180$  με την χρήση της σχέσης  $(\text{lon} + 540) \% 360 - 180$ .

Για το παράδειγμα στην παρούσα εργασία ως ενδιάμεσο σημείο προκύπτει το  $40^\circ 31' 07'' \text{ N}$ ,  $039^\circ 40' 51'' \text{ W}$  (στον χάρτη που ακολουθεί εμφανίζεται με κόκκινο χρώμα)

Για τον υπολογισμό των συντεταγμένων των υπολοίπων σημείων της διαδρομής επαναλαμβάνουμε την διαδικασία εύρεσης ενδιάμεσου σημείου μεταξύ ενδιάμεσων σημείων.



## Επίπεδη απεικόνιση



## Σφαιρική απεικόνιση



### 7.3 Λοξοδρομική πλεύση συνυπολογίζοντας τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες.

Όπως αναφέραμε και στην αρχή του κεφαλαίου, στην περίπτωση της λοξοδρομικής πλεύσης συνυπολογίζοντας τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες, η απόσταση μεταξύ των κόμβων θεωρείται σταθερή και το ζητούμενο είναι η εύρεση της βέλτιστης πορείας του σκάφους ώστε να επιτύχουμε την μικρότερη κατανάλωση καυσίμων .

Θυμίζουμε ότι η αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται ως:

$$\min FC(a) \tag{7.1}$$

Όπου FC είναι η κατανάλωση καυσίμου ως συνάρτηση της πορείας  $a$  του πλοίου.

#### 7.3.1 Σχεδιασμός κόμβων

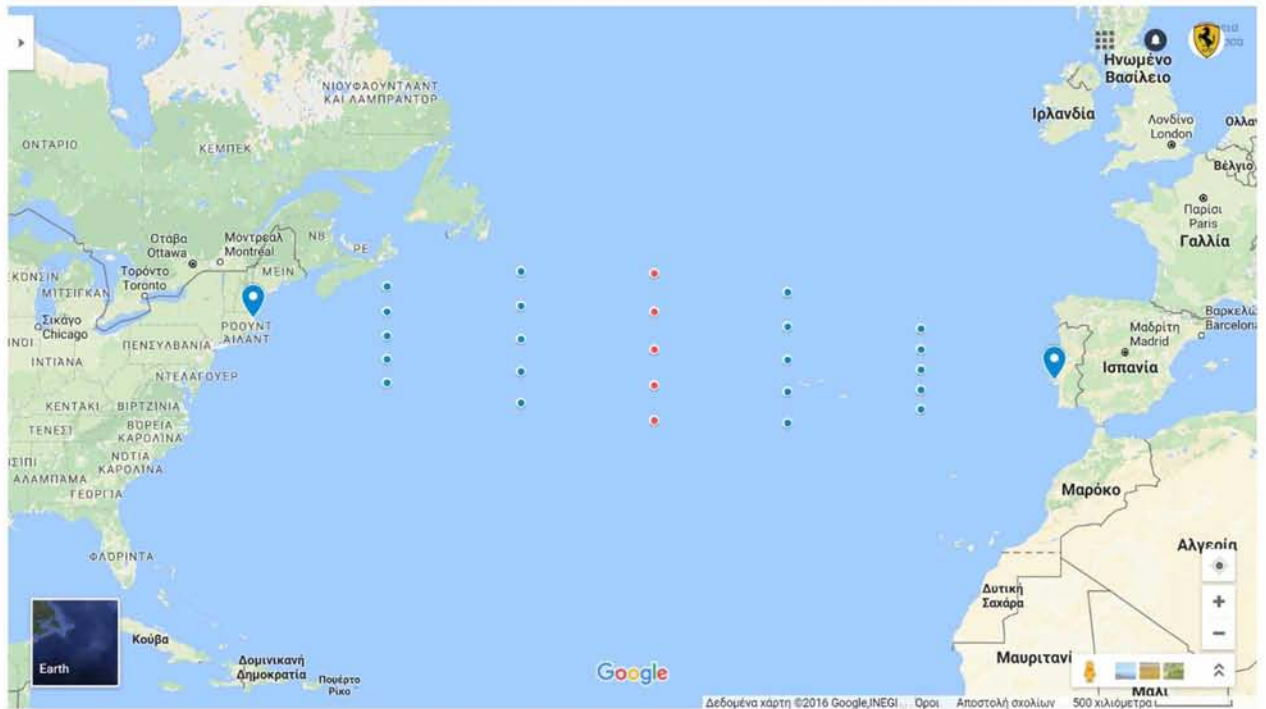
Όπως αναφέραμε στο 6<sup>ο</sup> Κεφ. η εύρεση της βέλτιστης πορείας του πλοίου απαιτεί την χρήση του αλγόριθμου Dijkstra. Ο σχεδιασμός των κόμβων πραγματοποιείται σύμφωνα με τα αναφερθέντα στην παράγραφο 6.2.2.

Για το παράδειγμα της εργασίας μας όπως υπολογίσαμε στην παράγραφο 7.2.1.2 η απόσταση μεταξύ των σημείων αναχώρησης και άφιξης με λοξοδρομική πλεύση είναι  $d = 5242$  Km, την οποία για να την καλύψει ένα πλοίο με σταθερή ταχύτητα  $V_s = 23,78$  knots απαιτείται χρονικό διάστημα περίπου 5 ημερών.

Στην περίπτωση της Λοξοδρομικής πλεύσης συνυπολογίζοντας τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες, ο καιρός είναι ο κυρίαρχος παράγοντας για την επιλογή της πορείας του πλοίου επομένως κατά την διάρκεια του ταξιδιού θα πρέπει να λαμβάνουμε συνεχώς ενημερώσεις για την μεταβολή του καιρού. Το ταξίδι χωρίζεται σε 6 βασικά στάδια, ένα για κάθε 20 ώρες ταξιδιού, για τα οποία σχεδιάζουμε το βασικό πλέγμα σύμφωνα με τα όσα αναφέραμε στην παράγραφο 6.2.2.

Η απόσταση μεταξύ των κόμβων είναι  $d_k = d/6 = 2524/6 = 874$  Km. και το γράφημα θα παρουσιάζει την παρακάτω εικόνα.

## Επίπεδη απεικόνιση

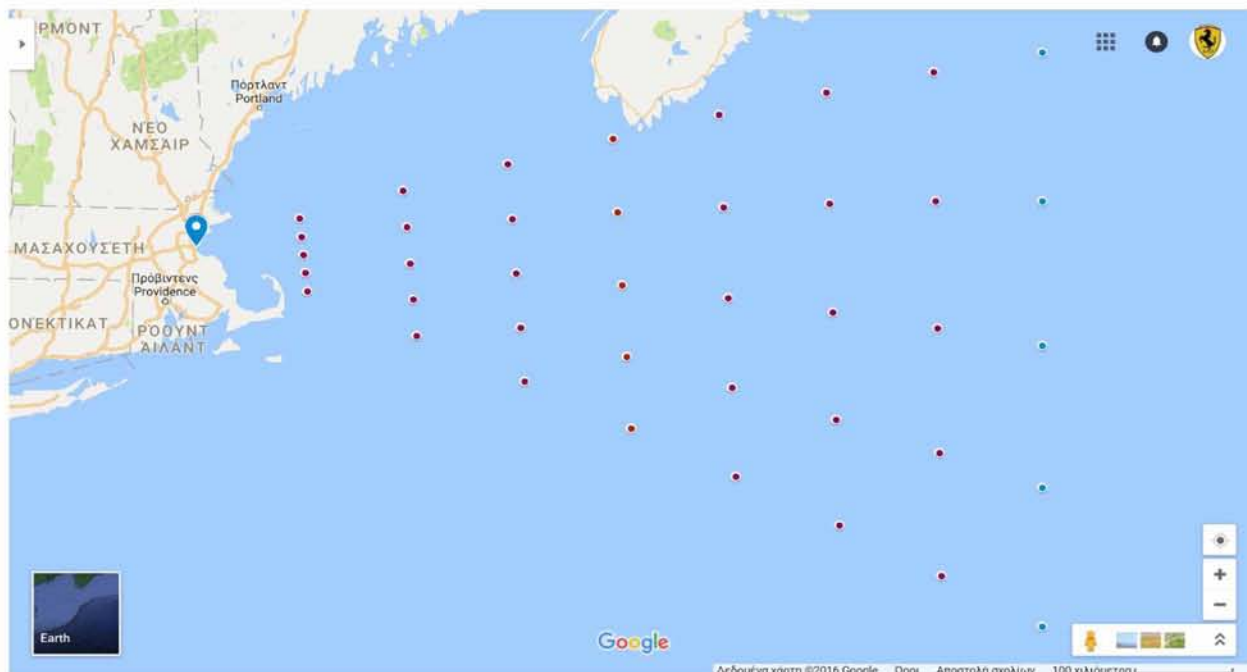


## Σφαιρική απεικόνιση

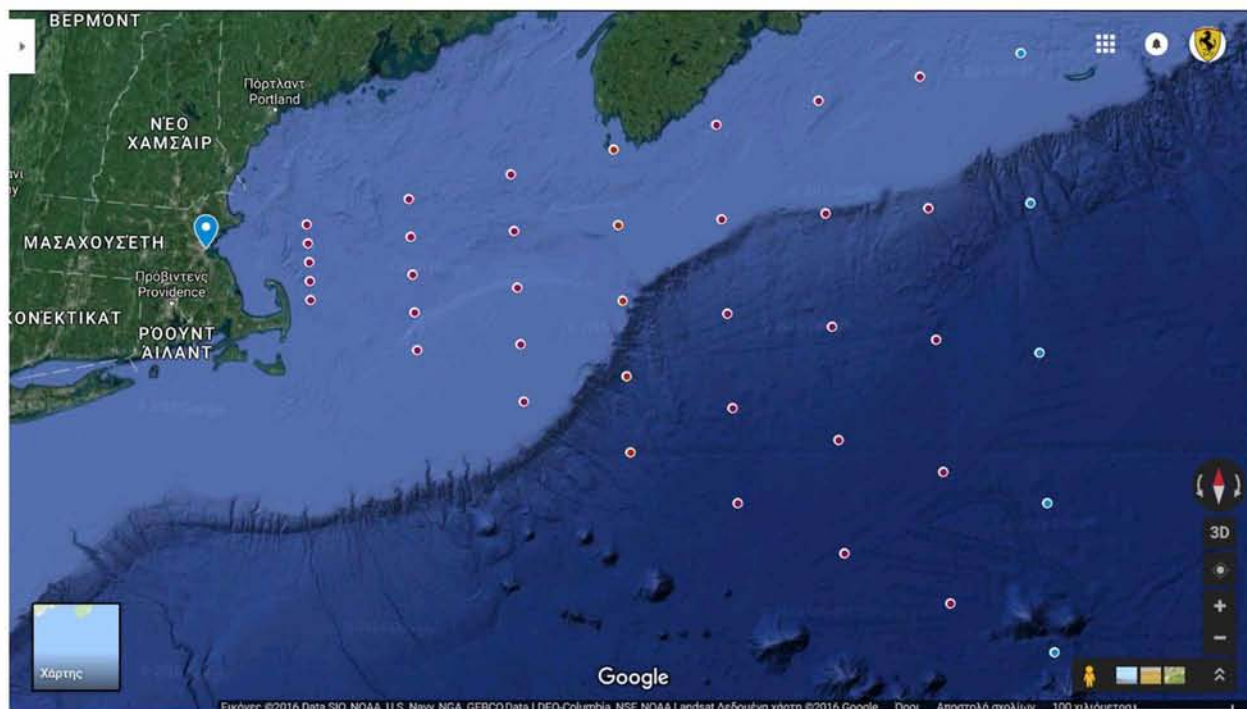


Κατά την διάρκεια κάθε σταδίου, κάθε ημέρας, λαμβάνουμε μετεωρολογικά δεδομένα κάθε 2,5 ώρες με αποτέλεσμα κάθε στάδιο του ταξιδιού να χωρίζεται σε 8 επιμέρους στάδια – κόμβους. Το γράφημα για τα επιμέρους στάδια στις πρώτες 20 ώρες του ταξιδιού παρουσιάζει την ακόλουθη εικόνα.

### Επίπεδη απεικόνιση



### Σφαιρική απεικόνιση



### 7.3.2 Ανάθεση κόστους σε κάθε τόξο

Το κόστος για κάθε τόξο, όπως αναφέρεται και στην παράγραφο 6.2.4 ορίζεται ως η κατανάλωση καυσίμου του πλοίου ώστε να ταξιδέψει από τον ένα κόμβο στον επόμενο. Η κατανάλωση καυσίμου για ένα δεδομένο τόξο μπορεί να βρεθεί από τον τύπο:

$$FC = b_S f_C \cdot P_B \cdot t \quad (7.2)$$

Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας θεωρούμε ότι η ειδική κατανάλωση καυσίμου πέδησης  $b_S f_C$  του πλοίου διατηρείται σταθερή και λογίζεται ως 166 g/Kwh. Επίσης η δύναμη πέδησης  $P_B$  διατηρείται σταθερή και λογίζεται ως 28.710 Kw. Έτσι το μόνο άγνωστο στην εξίσωση είναι ο χρόνος  $t$ . Για να βρούμε τον χρόνο  $t$  θα πρέπει να γνωρίζουμε το μήκος του τόξου και την εφικτή ταχύτητα του σκάφους. Ο χρόνος  $t$ , σε ώρες, δίνεται από τον τύπο:

$$t = \frac{d}{V} \quad (7.3)$$

Όπου  $d$  είναι το μήκος της λοξοδρομικής γραμμής που δίνεται από το Πυθαγόρειο Θεώρημα

$\Delta\psi = \ln (\tan (\pi / 4 + \phi_2 / 2) / \tan (\pi / 4 + \phi_1 / 2))$  («προβολική» διαφορά γεωγραφικού πλάτους)

$q = \Delta\phi / \Delta\psi$  (ή  $\sin\phi$  για την Α-Δ γραμμή)

$$d = \sqrt{(\Delta\phi^2 + q^2 \cdot \Delta\lambda^2)} \cdot R \text{ (Πυθαγόρειο Θεώρημα)} \quad (4.4)$$

όπου  $\phi$  είναι το γεωγραφικό πλάτος,  $\lambda$  είναι το γεωγραφικό μήκος, ως  $\Delta\lambda$  λαμβάνουμε την συντομότερη διαδρομή (<180 °), το  $R$  είναι η ακτίνα της Γης,  $\ln$  είναι ο φυσικός λογάριθμος.

Η εφικτή ταχύτητα του σκάφους επηρεάζεται από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες, όπως ο άνεμος και τα κύματα, αλλά και από τα θαλάσσια ρεύματα. Η εφικτή ταχύτητα του πλοίου δίνεται από τον τύπο:

$$V_{Real} = V_{Ship} + V_{Wind} + V_{Wave} + V_{Current} \quad (7.5)$$

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας θα θεωρήσουμε ότι τα κύματα και τα ρεύματα δεν επηρεάζουν την ταχύτητα του πλοίου όποτε θεωρούμε ότι

$$V_{Wave} = V_{Current} = 0.$$

Για την ταχύτητα του ανέμου έχουμε τον τύπο:

$$V_{Wind} = V_w \cdot |\cos \beta_w| \cdot c_x \quad (7.6)$$

Όπου  $V_w$  είναι η ταχύτητα του ανέμου σε Km/h,  $\beta_w$  η γωνία της σχετικής πορείας του ανέμου που υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\beta_{wind} = \begin{cases} |\gamma - \alpha| & \text{αν } 0^0 \leq \gamma \leq 180^0 \\ |\gamma - \alpha - 180^0| & \text{αν } 180^0 < \gamma < 360^0 \end{cases} \quad (7.7)$$

όπου  $\alpha$  η πορεία του πλοίου και  $\gamma$  η κατεύθυνση του ανέμου και  $c_x$  η σταθερά αντίστασης του ανέμου που εξαρτάται από τον τύπο του πλοίου και την σχετική γωνία  $\phi$  μεταξύ της πορείας  $\alpha$  του πλοίου, της σχετικής γωνίας του ανέμου  $\beta_w$  και της κατεύθυνσης  $\gamma$  του ανέμου .

Η γωνία  $\phi$  δίνεται από τον τύπο:

$$\phi = 180^0 - \beta_w \quad (7.8)$$

Για τον τύπου πλοίου του παραδείγματος μας, η σταθερά αντίστασης  $C_x$  δίνεται από τον πίνακα

$\phi$	$C_x$	$\phi$	$C_x$	$\phi$	$C_x$	$\phi$	$C_x$
0	0.58	50	0.56	100	-0.05	150	-0.52
5	0.62	55	0.48	105	-0.11	155	-0.55
10	0.65	60	0.4	110	-0.18	160	-0.58
15	0.71	65	0.37	115	-0.27	165	-0.54
20	0.78	70	0.25	120	-0.36	170	-0.5
25	0.76	75	0.17	125	-0.41	175	-0.47
30	0.75	80	0.1	130	-0.43	180	-0.45
35	0.73	85	0.05	135	-0.45		
40	0.7	90	0	140	-0.46		
45	0.67	95	-0.02	145	-0.49		

(7.9)

### 7.3.3 Εφαρμογή αλγόριθμου Dijkstra

Για να εφαρμόσουμε τον αλγόριθμο Dijkstra θα πρέπει να κατασκευάσουμε έναν πίνακα ο οποίος να αποτελείται από τις επιτρεπτές μετακινήσεις του πλοίου και τα κόστη που έχουμε αναθέσει σε κάθε τόξο. Για να κατασκευάσουμε τον πίνακα ακολουθούμε τα παρακάτω βήματα.

- 1) Επειδή το πλοίο δεν μπορεί να ταξιδέψει προς τα πίσω, επομένως μπορεί να μεταβεί μόνο στους κόμβους που βρίσκονται μπροστά του, επιτρέπουμε την κίνηση του πλοίου μόνο στους κόμβους που βρίσκονται στην επόμενη στήλη από αυτή που βρίσκεται το πλοίο.
- 2) Λαμβάνουμε τα μετεωρολογικά δεδομένα για κάθε στήλη κόμβων ανά 20 ώρες για την κατεύθυνση  $\gamma$  και την ταχύτητα  $V_w$  του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας. Χρησιμοποιώντας τον τύπο 4.7 υπολογίζουμε το  $\beta_w$  για κάθε τόξο.
- 3) Υπολογίζουμε την σχετική γωνία  $\phi$  με τον τύπο 4.8 και την συνέχεια την σταθερά αντίστασης ανέμου  $C_x$  με βάση τον πίνακα 4.9
- 4) Υπολογίζουμε την απόσταση μεταξύ κάθε ζεύγους κόμβων στους οποίους επιτρέπουμε την μετάβαση με την χρήση της εξίσωσης 4.4
- 5) Χρησιμοποιούμε τον τύπο 4.2 για να υπολογίσουμε το χρόνο  $t$  που χρειάζεται το πλοίο για να μεταβεί στον επόμενο επιτρεπτό κόμβο.

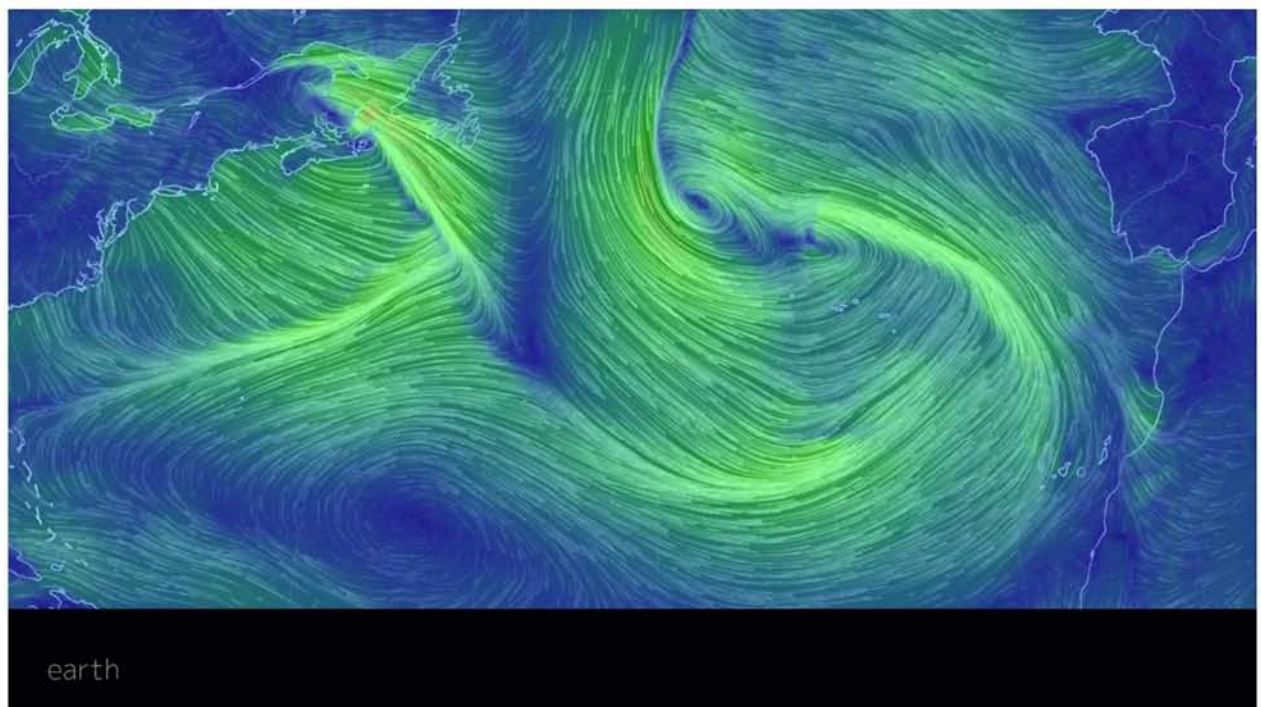
- 6) Θεωρώντας ότι η ειδική κατανάλωση καυσίμου πέδησης  $b_{sf_C}$  του πλοίου διατηρείται σταθερή και λογίζεται ως 166 g/Kwh όπως επίσης ότι η δύναμη πέδησης  $P_B$  διατηρείται σταθερή και λογίζεται ως 28.710 Kw, χρησιμοποιούμε τον τύπο 4.1 και υπολογίζουμε το κόστος κάθε τόξου.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας και χωρίς βλάβη τη γενικότητας υπολογίζουμε τον ακόλουθο πίνακα λαμβάνοντας ως μετεωρολογικά στοιχεία την μέση ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου για κάθε 20 ώρες του ταξιδιού ανάλογα με την περιοχή που βρίσκεται την συγκεκριμένη ημέρα το πλοίο.

Πίνακας μετεωρολογικών δεδομένων από 30/11/16 έως 5/12/16.

Άνεμος	20 ώρες	40 ώρες	60 ώρες	80 ώρες	100 ώρες	120 ώρες
Κατεύθυνση	330°	120°	180°	0°	30°	200°
Ταχύτητα	41km/h	26km/h	36km/h	34km/h	28km/h	35km/h

### Χάρτης ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας





### 7.3.3.1 Πίνακας δεδομένων ανά κόμβο

Κόμβοι	Απόσταση κόμβων d km	Πορεία πλοίου σε μοίρες	Αντίσταση ανέμου Cx	Ταχύτητα Πλοίου V Km/h	FC Πλοίου σε τόνους
0-1	861,6	76,16	0,2	46,3	88
0-2	848,2	86,39	0,38	50,9	79
0-3	862,4	96,57	0,5	56,2	74
0-4	902,8	106,37	0,68	59,2	66
0-5	966,4	115,16	0,73	68,6	67

1-6	822	83,31	-0,47	34,2	115
1-7	838,5	98,08	-0,57	30,3	132
1-8	905,2	111,24	-0,49	31,4	138
1-9	1012	122,21	-0,46	32	151
1-10	1149	131	-0,5	31,5	176

2-6	862,4	73,22	-0,44	36,2	114
2-7	840,3	87,36	-0,5	33,1	121
2-8	870,4	101,41	-0,58	29,7	140
2-9	947,6	114,09	-0,47	31,8	142
2-10	1062	124,21	-0,46	32,1	158

3-6	926,8	64,23	-0,4	38,3	116
3-7	869,7	77,26	-0,45	35,4	117
3-8	861,9	91,29	-0,53	31,9	129
3-9	904,6	104,58	-0,54	30,5	141
3-10	991,4	116,41	-0,47	31,8	149

4-6	1011	56,42	-0,28	40,8	118
4-7	924	68,12	-0,42	37,3	118
4-8	880,6	81,24	-0,47	34,5	122
4-9	886,5	95,1	-0,55	31	136
4-10	941	108,2	-0,52	30,8	145

5-6	1109	50,18	-0,18	42,4	124
5-7	999,3	60,1	-0,36	39,3	121
5-8	924,7	72	-0,44	36,3	121
5-9	892,8	85,14	-0,49	33,5	127
5-10	913,9	98,38	-0,57	30,2	144

6-11	810,6	90,47	-0,01	44	87
6-12	862,6	106,53	-0,12	42,8	96
6-13	972,1	120,15	-0,36	37,5	124
6-14	1122	130,3	-0,43	34	157
6-15	1300	138,1	-0,46	31,7	196

7-11	847,8	76,2	0,16	45,4	89
7-12	839,5	92,4	-0,01	44	91
7-13	897,2	108,4	-0,17	42,2	102
7-14	1009	120,5	-0,36	37,8	127
7-15	1161	130,42	-0,43	34,5	160

8-11	932,4	63,47	0,38	50,1	89
8-12	868,7	78,33	0,15	45,1	92
8-13	868,3	94,24	-0,01	44	94
8-14	931,1	109,11	-0,11	42,7	104
8-15	1046	121,25	-0,28	38,8	129

9-11	1053	53,43	0,5	54,7	92
9-12	945,3	66,02	0,35	49,1	92
9-13	889,8	80,38	0,1	44,6	95
9-14	896,7	96,03	-0,03	43,9	98
9-15	964,4	110,48	-0,18	41,7	110

10-11	1199	45,53	0,67	60,9	94
10-12	1059	55,47	0,56	55,4	91
10-13	958,5	68,11	0,32	48,3	95
10-14	911	82,37	0,07	44,3	98
10-15	924,6	97,36	-0,03	43,9	100

11-16	826,8	98,06	0,07	44,3	89
11-17	895,1	111,42	0,3	47,7	90
11-18	1005	122,51	0,44	52	92
11-19	1145	131,34	0,58	57	96
11-20	1305	138,16	0,68	61,2	102

12-16	842,4	81,38	-0,04	43,8	92
12-17	851,5	96,11	0,07	44,3	92
12-18	912,1	109,36	0,25	46,8	93
12-19	1015	120,5	0,4	50,9	95
12-20	1149	129,45	0,56	56,1	98

13-16	921,8	66,53	-0,25	40,6	108
13-17	873,4	80,16	-0,05	43,7	95
13-18	876	94,22	0,05	44,1	95
13-19	929,2	107,36	0,2	46	97
13-20	1025	118,54	0,39	50,3	97

14-16	1051	55,05	-0,41	36	139
14-17	956,4	66,08	-0,2	41,2	110
14-18	903,8	79	-0,06	43,6	99
14-19	900,3	92,4	0,02	44	98
14-20	946,3	105,42	0,17	45,5	99

15-16	1213	46,09	-0,44	33,6	172
15-17	1086	54,48	-0,41	35,9	144
15-18	990	65,25	-0,27	40,2	117
15-19	933,5	77,47	-0,07	43,5	102
15-20	924,1	91,03	0,01	44	100

16-21	870,3	105,13	-0,11	43,2	96
16-22	921,8	113,07	-0,03	43,9	100
16-23	988,6	120,04	0	44	107
16-24	1068	126,05	0,02	44,1	115
16-25	1157	131,13	0,15	44,8	123

17-21	853,1	90,56	-0,36	39	104
17-22	873,4	99,43	-0,18	42,2	98
17-23	912,9	107,56	-0,07	43,6	100
17-24	969,3	115,19	-0,02	44	105
17-25	1040	121,49	0,02	44	113

18-21	888,5	76,58	-0,44	35,5	120
18-22	876	85,38	-0,41	37,5	111
18-23	883,7	94,2	-0,28	40,6	103
18-24	911	102,42	-0,15	42,7	102
18-25	956,2	110,26	-0,05	43,8	104

19-21	970,8	64,43	-0,5	32,5	142
19-22	929,2	72,23	-0,45	34,7	128
19-23	905,5	80,37	-0,43	36,3	119
19-24	901	89,06	-0,37	38,7	111
19-25	916	97,3	-0,2	41,8	104





```

        return min_index;
    }

    // Function to print shortest path from source to j
    // using parent array
    void printPath(int parent[], int j)
    {
        // Base Case : If j is source
        if (parent[j]==-1)
            return;

        printPath(parent, parent[j]);
        printf("%d ", j);
    }

    // A utility function to print the constructed distance
    // array
    int printSolution(int dist[], int n, int parent[])
    {
        int src = 0;

        printf("Vertex\t Fuel Cost\t Path");

        for (int i = 1; i < V; i++)
        {
            printf("\n%d -> %d \t\t %d\t\t %d ", src, i, dist[i], src);

            printPath(parent, i);
        }
    }

    // Funtion that implements Dijkstra's single source shortest path
    // algorithm for a graph represented using adjacency matrix

```

```

// representation
void dijkstra(double graph[V][V], int src)
{
    int dist[V]; // The output array. dist[i] will hold
                // the shortest distance from src to i
                // sptSet[i] will true if vertex i is included / in shortest
                // path tree or shortest distance from src to i is finalized

    bool sptSet[V];

    // Parent array to store shortest path tree

    int parent[V];

    // Initialize all distances as INFINITE and sptSet[] as false
    for (int i = 0; i < V; i++)
    {
        parent[0] = -1;
        dist[i] = INT_MAX;
        sptSet[i] = false;
    }

    // Distance of source vertex from itself is always 0
    dist[src] = 0;

    // Find shortest path for all vertices
    for (int count = 0; count < V-1; count++)
    {
        // Pick the minimum distance vertex from the set of
        // vertices not yet processed. u is always equal to src
        // in first iteration.

        int u = minDistance(dist, sptSet);
    }
}

```

```

// Mark the picked vertex as processed
    sptSet[u] = true;

// Update dist value of the adjacent vertices of the
// picked vertex.
    for (int v = 0; v < V; v++)

// Update dist[v] only if it is not in sptSet, there is
// an edge from u to v, and total weight of path from
// src to v through u is smaller than current value of
// dist[v]
        if (!sptSet[v] && graph[u][v] &&
            dist[u] + graph[u][v] < dist[v])
        {
            parent[v] = u;
            dist[v] = dist[u] + graph[u][v];
        }
    }

// print the constructed distance array
    printSolution(dist, V, parent);
}

// Fuel Cost matrix
int main()
{
    /* Let us create the example graph discussed above */

    double graph[V][V] = {{0, 88, 79, 74, 66, 67, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0},
    0, 0, 0, 0},

```





```

};

    dijkstra(graph, 0);

    return 0;

}

```

### 7.3.3.4 Αποτελέσματα Αλγόριθμου Dijkstra

 "C:\Users\User\Desktop\Weather routing dijkstra.exe"

```

Vertex      Fuel Cost      Path
0 -> 1      88             0 1
0 -> 2      79             0 2
0 -> 3      74             0 3
0 -> 4      66             0 4
0 -> 5      67             0 5
0 -> 6      184            0 4 6
0 -> 7      184            0 4 7
0 -> 8      188            0 4 8
0 -> 9      194            0 5 9
0 -> 10     211            0 4 10
0 -> 11     271            0 4 6 11
0 -> 12     275            0 4 7 12
0 -> 13     282            0 4 8 13
0 -> 14     292            0 4 8 14
0 -> 15     304            0 5 9 15
0 -> 16     360            0 4 6 11 16
0 -> 17     361            0 4 6 11 17
0 -> 18     363            0 4 6 11 18
0 -> 19     367            0 4 6 11 19
0 -> 20     373            0 4 6 11 20
0 -> 21     456            0 4 6 11 16 21
0 -> 22     459            0 4 6 11 17 22
0 -> 23     461            0 4 6 11 17 23
0 -> 24     465            0 4 6 11 18 24
0 -> 25     467            0 4 6 11 18 25
0 -> 26     543            0 4 6 11 18 25 26
Process returned 0 (0x0)   execution time : 0.037 s
Press any key to continue.

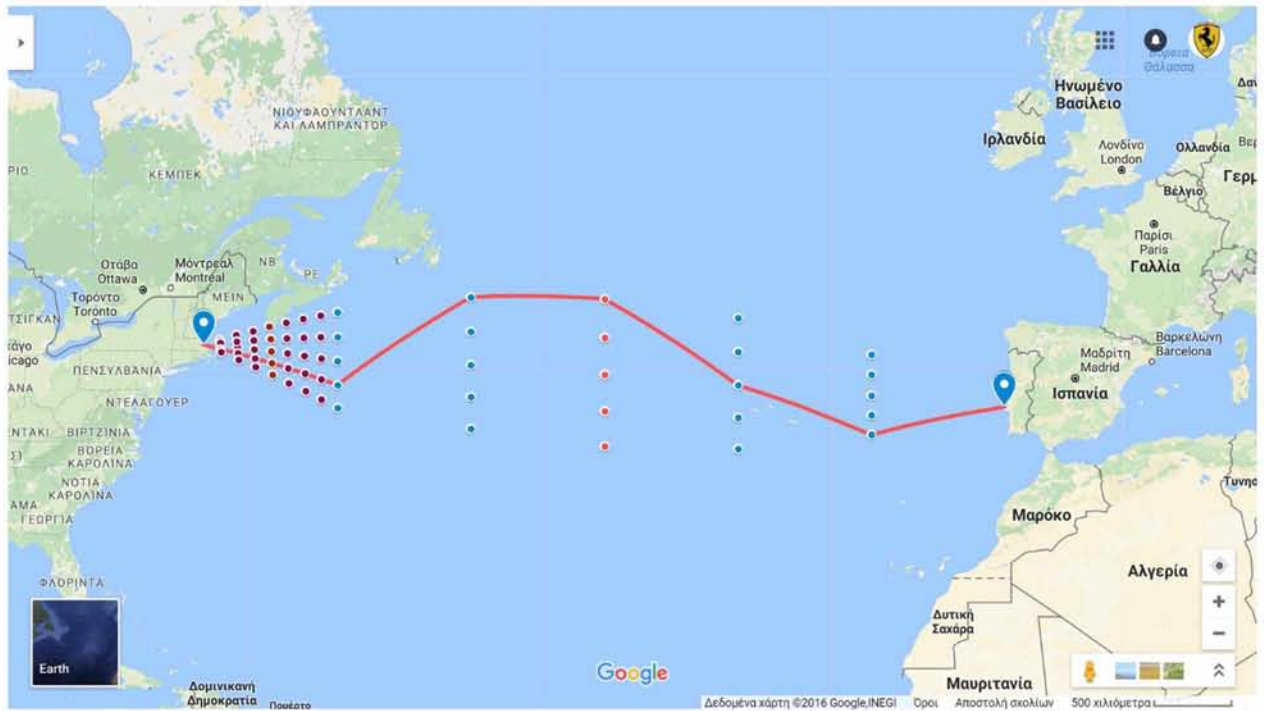
```

Βέλτιστη πορεία: 0 → 4 → 6 → 11 → 18 → 25 → 26

Συνολική απόσταση: 5609.5 Km

Συνολική κατανάλωση καυσίμων: 543 tones

## Επίπεδη απεικόνιση



## Σφαιρική απεικόνιση



## 7.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΛΕΥΣΗΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ	ΜΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ	ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΤΑΞΙΔΙΟΥ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΥΣΙΜΩΝ	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ
ΟΡΘΟΔΡΟΜΙΑ	5247 Km	23,78 Kn	119,3 h	568 t	318.080 €
ΛΟΞΟΔΡΟΜΙΑ	5133 Km	23,78 Kn	116,7 h	556 t	311.360 €
ΛΟΞΟΔΡΟΜΙΑ ΜΕ WEATHER ROUTING	5605 Km	26,8 Kn	112,9 h	543 t	304.080 €

Παρατηρώντας προσεκτικά τα δεδομένα που παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα γίνεται γρήγορα/εύκολα αντιληπτό ότι η συνολική απόσταση που διανύει το πλοίο για το δεδομένο ταξίδι είναι συντομότερη αν επιλέξει την λοξοδρομική πορεία. Λαμβάνοντας υπόψη το συνολικό χρόνο, τη συνολική κατανάλωση καυσίμων και κατ' επέκταση το συνολικό κόστος αυτών, που είναι και το ζητούμενο, συμπεραίνουμε ότι η διάρκεια του ταξιδιού είναι σημαντικά μικρότερη αν το πλοίο επιλέξει την λοξοδρομική πορεία με χρήση του προγράμματος Weather Routing.

Επιπρόσθετα, η αύξηση της ταχύτητας του σκάφους εξαιτίας της βέλτιστης πορείας που παρέχει το εν λόγω πρόγραμμα (Weather Routing) δίνει την δυνατότητα στο πλοίο να ολοκληρώσει το συγκεκριμένο ταξίδι 4 περίπου ώρες συντομότερα συγκριτικά με την λοξοδρομική πορεία. Εν συγκρίσει δε, με την ορθοδρομική πορεία, η διαφορά στους χρόνους άφιξης στον τελικό προορισμό, ανέρχεται σε 6,5 ώρες. Αποκαλύπτοντας σημαντικά χαρακτηριστικά των δεδομένων τους, η εκτίμηση για το συνολικό κόστος καυσίμων του συγκεκριμένου πλου προσδιορίζεται μικρότερη κατά περίπου 7,000€ με χρήση του Weather Routing σε σχέση με τη λοξοδρομική πορεία και 14,000€ σε σχέση με την ορθοδρομική πορεία αντίστοιχα.

Συνυπολογίζοντας στο κόστος λειτουργίας του πλοίου και τις επιμέρους δαπάνες κάθε επιπλέον ώρας ταξιδιού, καθίσταται σαφής η εκθετική αύξηση του συνολικού κόστους ολοκλήρωσής/πραγματοποίησής του. Παραθέτοντας/αναφέροντας ενδεικτικά τα έξοδα συντήρησης του πλοίου, το κόστος που σχετίζεται με το πλήρωμά του, τις πιθανές ζημιές αλλά και τις πιθανές ρήτρες που έχει επιβάλει ο charter για την μη τήρηση της προκαθορισμένης ώρας άφιξης του πλοίου, η εξοικονόμηση χρημάτων που μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση του προγράμματος Weather Routing αποδεικνύεται εξαιρετικά σημαντική και η χρήση του επιβεβλημένη.

## **8 Διαθέσιμα συστήματα δρομολόγησης στην αγορά.**

### **8.1 Σημαντικότερα συστήματα στην αγορά.**

Η εισαγωγή των επιλεγμένων εταιριών βασίζεται σε πληροφορίες που βρίσκονται στις αντίστοιχες ιστοσελίδες τους. Μια επισκόπηση των δυνατοτήτων του λογισμικού παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.1, κυρίως με βάση τα ερωτηματολόγια.

#### **AWT (Storm Geo) – Bon Voyage**

Η AWT παρέχει πληροφορίες για την πορεία του πλοίου με βάση την ελαχιστοποίηση του χρόνου ταξιδιού ή της κατανάλωσης καυσίμου. Bon Voyage είναι AWT για λύσεις πάνω στο σκάφος, το οποίο παρέχει μια γραφική επαφή του χρήστη, λαμβάνοντας σε έναν λογαριασμό την επιφανειακή πίεση, τους ανέμους, τη ν επιφάνεια και το ύψος των κυμάτων, τις τροπικές καταιγίδες, πάγο, την τρέχουσα θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας, και όλα παραδίδονται στο σύστημα μέσω του ηλεκτρονικού ταχυδρομείου.

#### **Force Technology – Sea Planner**

Το Sea Planner είναι ένα σύστημα που αναπτύχθηκε μέσω της συνεργασίας μεταξύ της FORCE Τεχνολογίας και της DMI (υπηρεσία θαλάσσιας μεταφοράς). Το Sea Planner προσφέρει και δείχνει επί του σκάφους την πορεία του, την οποία την υπολογίζει θέτοντας ως στόχο, είτε ή την ελάχιστη διάρκεια του ταξιδιού, ή fixed ETA με σταθερή δύναμη, ή fixed ETA με βελτιστοποιημένη ταχύτητα, ή fixed ETA με σταθερή RPM.

#### **Jeppesen - VVOS**

Η Jeppesen είναι μέρος της Boeing με έδρα τις Ηνωμένες Πολιτείες. Το λογισμικό που χρησιμοποιεί για να υπολογίζει την πορεία του πλοίου ονομάζεται VVOS, (Vessel and Voyage Optimisation Solution) Το λογισμικό χρησιμοποιεί πληροφορίες από το πλοίο για να υπολογίσει την κατανάλωση καυσίμων, τις κινήσεις του πλοίου, την κόπωση του σκάφους καθώς και τον καιρό και τις συνθήκες της θάλασσας.

#### **MeteoGroup - SPOS**

Το MeteoGroup's είναι λογισμικό δρομολόγησης επί του σκάφους και το λογισμικό ονομάζεται SPOS (Ship Performance Optimisation System). Έχει σχεδιαστεί για να λαμβάνει υπόψη ειδικά χαρακτηριστικά του πλοίου. Η πορεία που βγάζει το πρόγραμμα για το πλοίο βασίζεται σε δύο μετεωρολογικές προβλέψεις και τα τρέχοντα δεδομένα στον ωκεανό.

## SeaWare (StormGeo) - Enroute

Η SeaWare τη Enroute είναι μια σουηδική εταιρεία που ασχολείται με λογισμικό για τον υπολογισμό της πορείας πλοίων . Η SeaWare είναι μια εταιρεία Storm Geo. Η SeaWare είναι ενσωματωμένη στο λογισμικό DNV-GL DNV-GL πλοηγό. Ένα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του λογισμικού είναι ότι το μοντέλο μπορεί να κάνει πρόβλεψη για parametric roll.

Πίνακας: Ανάλυση δυνατοτήτων του λογισμικού

Feature	Συνομογραφίες: Ind: Έμμεσα.		TBI: πρέπει		να
	StormGeo AWT	Force Technology	Jeppesen	Meteo Group	StormGeo SeaWare
Name of software	BonVoyage	SeaPlanner	VVOS	SPOS	EnRoute
Power opt.	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Surface currents	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Tidal currents	Yes	Yes	Yes	TBI	?
Ice avoidance	Yes	Ind.	Yes	Yes	Shown
Ship dynamics	Yes	Yes	Yes	Module	Yes
Graphical weather	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Length of forecast	16 days	10 days	15 days	9 days	15 days
Optimisation time	15s	ca. 1 min	Minutes	Minutes	15+s
Pirated waters	Yes	Yes	Yes	Ind.	Yes
SECA's	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Wind on speed	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Waves on speed	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Hull fouling	Ind.	Yes	Ind.	Ind.	Ind.
Propeller fouling	Ind.	Yes	Ind.	Ind.	Ind.
Shallow water	No	Yes	Yes	No	TBI
Draught & trim	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Algorithm	No info	MC*	3DDP.	In house	GA
Weather provider	GFS	DMI	Several	In house	ECMWF/ RTOFS
Coastal routing	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Forecast res. span	2/0.125	0.5/0.1 deg	ca 1 deg	?	var./0.125

## 8.2 Applied algorithms.

Η χρήση πολλών διαφορετικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης πορείας έχουν παρουσιαστεί τις τελευταίες δεκαετίες. Η χρήση ενός καλού αλγορίθμου μπορεί να έχει μεγάλο όφελος σχετικά με την ποιότητα της λύσης που παρέχεται. Παρακάτω θα αναλύσουμε τους πιο συχνούς τρόπους που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας: Ο 3 Dimensional Dynamic Programming, Ο GA (Genetic Algorithm) και ο Dijkstra algorithm.

### 3DDP

Η μέθοδος αυτή υπολογίζει μια διαδρομή με βάση αν το πλοίο πρέπει να επιβραδύνει ή να επιταχύνει, προκειμένου να εξοικονομηθεί καύσιμο. Με την μέθοδο 3DDP, φαίνεται ότι υπάρχει σημαντική εξοικονόμηση καυσίμων σε σύγκριση με την πιο κοινή μέθοδο (2DDP). Η μέθοδος που παρουσιάζεται στην (Shao et al., 2006) δεν λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα των καιρικών συνθηκών, αλλά χειρίζεται μόνο τα στοιχεία πρόβλεψης του καιρού άμεσα.

### Πλεονεκτήματα

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα του δυναμικού προγραμματισμού ως προς τον τρόπο επίλυσης του weather routing είναι ότι προσπαθεί να συμπεριλάβει στον τρόπο υπολογισμού του τυχαίες και απρόβλεπτες από μετεωρολογία τοπικές μεταβολές του καιρού, καθώς και τις απότομες μεταβολές του. Ένα άλλο πλεονέκτημά του είναι ότι είναι γρηγορότερος από το calculus of variations. Σε αντίθεση με το calculus of variations ο δυναμικός προγραμματισμός ενσωματώνει ένα μηχανισμό αποφάσεων στην τεχνική του, αποκλείοντας πολλά σημεία τα οποία στις άλλες μεθόδους παραμένουν ως πιθανά. Όπως και στο calculus of variations, ο δυναμικός προγραμματισμός μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλά προβλήματα.

### Μειονεκτήματα

Η δυνατότητα να περιληφθεί το τυχαίο του καιρού είναι ένα πλεονέκτημα του δυναμικού προγραμματισμού. Παρόλα αυτά μελέτες έχουν δείξει ότι ο καιρός αλλάζει σύμφωνα με την αλυσίδα του Markov. Έτσι κατά τη μορφοποίηση αυτού αυξάνεται δραματικά η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου. Ένα ακόμη μειονέκτημα του δυναμικού προγραμματισμού είναι ότι απαιτεί πολύ υπολογιστική ισχύ. Η ακρίβεια της λύσης της μεθόδου βασίζεται στη λεπτομέρεια του πλέγματός μας. Αυξάνοντας την λεπτομέρεια αυτή αυξάνουμε εκθετικά και το χρόνο υπολογισμού της βέλτιστης διαδρομής.

### Dijkstra

Ο (Mannarini et al., 2013), περιγράφει την ανάπτυξη ενός πρωτότυπου μοντέλου που στηρίζεται σε μια τροποποίηση του αλγορίθμου Dijkstra. Η μέθοδος λαμβάνει υπόψη μόνο το ύψος των κυμάτων, την περίοδο αιχμής, καθώς και την κατεύθυνση τους, μαζί με τους περιορισμούς ασφαλείας με βάση αυτές τις

παραμέτρους. Η μέθοδος δε κατά το στάδιο που περιγράφεται στο άρθρο ενημερώνει για τις εθελοντικές μειώσεις της ταχύτητας.

Ο (Padhy et al., 2008) δίνει μια άλλη μέθοδο για τη δρομολόγηση χρησιμοποιώντας μια τροποποίηση του αλγορίθμου Dijkstra. Και σε αυτή τη μέθοδο η μείωση της ταχύτητας είναι επίσης δυνατή. Η μέθοδος λαμβάνει υπόψη την επιρροή που έχουν τα καιρικά φαινόμενα σε σχέση με την ταχύτητα του πλοίου και μπορεί επίσης να χειριστεί τις ζώνες περιορισμένης πρόσβασης, όπως η γη, μέσω της αλλαγής των βαρών των άκρων.

### **Πλεονεκτήματα**

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η απλότητα χρησιμοποίησής της. Το περιβάλλον εισαγωγής, αλλά και εξαγωγής δεδομένων είναι απλούστερο και πιο εύχρηστο σε σχέση με άλλες μεθόδους.

### **Μειονεκτήματα**

Το βασικότερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι οι καιρικές συνθήκες δεν αλλάζουν κατά τη διαδικασία του ταξιδιού. Όταν αυτό συμβαίνει ο αλγόριθμος θα πρέπει να τρέξει εξ' αρχής και να λάβει σαν σημείο αφετηρίας το σημείο που βρίσκεται το πλοίο την παρούσα χρονική στιγμή. Η μέθοδος απαιτεί τη δημιουργία πλέγματος για την επεξεργασία των δεδομένων. Όσο πιο πυκνό αυτό το πλέγμα, τόσο καλύτερη και η τελική προσέγγιση της βέλτιστης διαδρομής. Δυστυχώς όμως όσο πιο πυκνό το πλέγμα τόσο η απαίτηση για υπολογιστικούς πόρους αυξάνεται εκθετικά. Ένα ακόμα μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν μπορούμε να μειώσουμε σκόπιμα την ταχύτητα του πλοίου

## **8.3 Genetic Algorithm**

Οι πληροφορίες που λαμβάνουμε από τα πλοία καθώς και οι περιορισμοί που υπάρχουν έχουν μοντελοποιηθεί, χρησιμοποιώντας τους φορείς που ανταποκρίνονται τα πλοία. Σε αυτήν την προτεινόμενη μέθοδο, οι στόχοι της βελτιστοποίησης της πορείας του πλοίου γίνεται με βάση την μείωση της κατανάλωσης καυσίμου καθώς και της βελτιστοποίησης της ταχύτητας με βάση των κανόνων που ισχύουν (ETA).

Για παράδειγμα, για τον Βόρειο Ατλαντικό, χρειαζόμαστε τουλάχιστον 9 μεταβλητές για τις ταχύτητες και 7 για την πορεία του πλοίου για να πούμε ότι οι πληροφορίες που έχουμε είναι ασφαλής.



### **Πλεονεκτήματα.**

Ο GA είναι σχετικά πιο απλός στη χρήση. Ο αλγόριθμος μπορεί να σταματήσει ανά πάσα στιγμή αν βρεθεί μια βέλτιστη λύση που παράγεται με βάση την κατάταξη Pareto. Μέσω κάποιων εξειδικευμένων φορέων ο αλγόριθμος είναι πολύ πιθανό να σταματήσει σε τοπικά ελάχιστα. Από τα μέτωπα Pareto ο χειριστής έχει τη δυνατότητα, μέσω των παραμέτρων κατάταξης, να επιλέξει την κατάλληλη λύση με βάση την ΕΤΑ, την κατανάλωση καυσίμου και την ασφάλεια.

### **Μειονεκτήματα.**

Η ώρα άφιξης και η ελάχιστη κατανάλωση καυσίμου πρέπει να γίνεται ταυτόχρονα. Ο αλγόριθμος δεν εξασφαλίζει τη βέλτιστη λύση, αλλά μάλλον θα δώσει μια προσέγγιστική βέλτιστη λύση με την αύξηση των επαναλήψεων. Η μέθοδος GA δεν είναι πολύ γρήγορη, δεδομένου ότι εξαρτάται από το μέγεθος των πληροφοριών που παρέχει το πλοίο που όσο αυξάνονται, αυξάνεται και ο χρόνος υπολογισμού.

## 9. Επίλογος.

Η χαρτογράφηση της πορείας των πλοίων (weather routing), παράσχει μια κατανόηση των σημερινών απαιτήσεων του προγράμματος δρομολόγησης. Έχει αποκαλύψει τις τρέχουσες τάσεις – απαιτήσεις της αγοράς, συμπεριλαμβάνοντας την πρόγνωση του καιρού καθώς και άλλων καιρικών συνθηκών που επικρατούν οι οποίες παίζουν σημαντικό ρόλο στην δρομολόγηση του πλοίου.

Το weather routing είναι ένα σημαντικό εργαλείο για την ναυσιπλοΐα, καθώς προβλέπει και ελέγχει δύο σημαντικούς παράγοντες για την ναυσιπλοΐα, την κατανάλωση καυσίμων καθώς και την εκπομπή ρύπων, που παίζουν σημαντικό ρόλο στην εποχή μας. Η δυνατότητα της βελτιστοποίησης της ταχύτητας για το ταξίδι έχει γίνει απαίτηση για τα εργαλεία δρομολόγησης πορείας των πλοίων. Διαπιστώνεται ότι τα λογισμικά δρομολόγησης είναι σε θέση να προτείνουν διαφορετικές διαδρομές για το πλοίο που αναφέρονται σε στοιχεία όπως: η βελτιστοποίηση της ταχύτητας και εξισορρόπησης του κόστους, την ώρα άφιξης, καθώς και στοιχεία για το πλοίο και την ασφάλεια του φορτίου.

Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στους αλγόριθμους βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται στα λογισμικά δρομολόγησης ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες σε άμεση συσχέτιση με την έρευνα που γίνεται για την βελτιστοποίηση τέτοιων λογισμικών. Το συμπέρασμα είναι ότι οι λιγότερο προηγμένοι αλγόριθμοι εξασθενούν σταδιακά και υπερτερούν τα πιο προηγμένα λογισμικά όπως οι εκδόσεις του 3D Δυναμικού Προγραμματισμού και ο Γενετικός Αλγόριθμος. Αυτοί οι πιο προηγμένοι αλγόριθμοι αποδίδουν καλύτερα όταν ο χρόνος υπολογισμού είναι περιορισμένος.

Οι περιοχές SECA, παρουσιάζουν στις μέρες μας, μεγάλο ενδιαφέρον στον τομέα του weather routing. Καθώς σε αυτές τις περιοχές η κατανάλωση καυσίμων και οι εκπομπές ρύπων των πλοίων πρέπει να ελέγχονται. Επίσης, παρατηρούμε ότι αρμόδιοι οργανισμοί επιβάλλουν κυρώσεις – πρόστιμα στις εταιρείες που διέρχονται μέσα από αυτές τις περιοχές ή άλλοι τις θεωρούν απαγορευμένες περιοχές και δεν επιτρέπουν στις εταιρείες να διέρχονται από αυτές. Η ύπαρξη αυτών των περιοχών, που κίνητρο έχουν να κρατάνε τις εκπομπές ρύπων σε χαμηλότερο επίπεδο ή για να μειώσουν τους ρύπους σε χαμηλότερα επίπεδα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τις εταιρείες ως στοιχείο κοινωνικής και περιβαλλοντικής ευθύνης. Επομένως, καταλαβαίνουμε ότι αυτές οι περιοχές διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην δρομολόγηση του πλοίου.

Η αβεβαιότητα που υπάρχει μέχρι και σήμερα για την πρόβλεψη του καιρού καθώς και για το χρονικό διάστημα που θα διαρκέσει μια πιθανή καιρική συνθήκη παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον για τις εταιρείες που ασχολούνται και είναι υπεύθυνες να χαράξουν μία ή περισσότερες πορείες για το πλοίο καθώς επηρεάζει άμεσα την ασφάλεια των παραγόμενων διαδρομών. Αυτό το πρόβλημα έχει

δημιουργήσει την απαίτηση για περεταίρω έρευνα καθώς και συνεργασία μεταξύ των μετεωρολογικών κέντρων και των εταιρειών που είναι υπεύθυνες για την χάραξη και μελέτη της βέλτιστης πορείας του πλοίου.

Η έννοια του weather routing έχει σκιαγραφηθεί μέσα από τα μοντέλα περιορισμών που υπάρχουν για να βγει η πορεία των πλοίων, για παράδειγμα τα μοντέλα κατανάλωσης καυσίμου καθώς και άλλων βασικών στοιχείων που απαιτούνται (καιρικά φαινόμενα). Ένα βασικό μοντέλο κατανάλωσης καυσίμου μπορεί να δημιουργηθεί και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση όταν δεν είναι διαθέσιμες μεγάλες ποσότητες πληροφοριών που αφορούν το πλοίο.

Βασικός στόχος των στοιχείων που χρησιμοποιούνται σε ένα πρόγραμμα weather routing είναι να είναι όσο το δυνατόν απλούστερα ή να υπάρχει ένα είδος μοντελοποίησης των στοιχείων για την εύκολη χρήση τους. Σε ένα τέτοιο μοντέλο η αβεβαιότητα παίζει σημαντικό ρόλο, όπως η εκτιμώμενη κατανάλωση καυσίμου, ιδίως αν ληφθούν υπόψη οι επιρροές από την αντίσταση του ανέμου και του κύματος, που η έρευνα είναι ακόμα σε εξέλιξη. Ο στόχος των ναυτιλιακών εταιρειών για την απλούστευση των μοντέλων του weather routing έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει ακαδημαϊκή έρευνα για την εύρεση του ακριβέστερου μοντέλου, που αυτή την στιγμή δεν μπορεί να εφαρμοστεί βιομηχανικά.

Ο χειρισμός των περιβαλλοντικών περιορισμών είναι μεγάλης σημασίας, αφού είναι αυτοί που προσδιορίζουν τους παράγοντες για την εύρεση της βέλτιστης πορείας, που αν εφαρμοστούν λανθασμένα ή δεν ακολουθηθούν τότε θέτουν σε κίνδυνο το πλοίο, το φορτίο, το πλήρωμα αλλά και την ασφάλεια του περιβάλλοντος. Ο χειρισμός και των δύο παραγόντων (ETA – περιβάλλον) γίνεται με την χρήση DIRECT αλγορίθμου με πολύ απλό τρόπο.

Οι νέοι κανονισμοί και διατάξεις που έχουν προταθεί στο πλαίσιο του IMO, MSC1. Circ 1228 (IMO, 2007), μετά από δοκιμές σε σκάφη έχουμε καταλήξει ότι μόνο οι πιο αντίξοες καιρικές συνθήκες οδηγούν σε περιορισμούς στην δρομολόγηση του πλοίου. Η ποιότητα αυτών των δοκιμών είναι ακόμα υπό αμφισβήτηση και έχουν αναθεωρηθεί πρόσφατα, όμως δεν έχουν δοκιμαστεί εκτενώς ώστε να προκύψουν νέα ασφαλή συμπεράσματα.

Η διασφάλιση του φορτίου είναι μείζονος σημασίας, και έπεται μόνο της ασφάλειας του πληρώματος και του σκάφους. Τα προγράμματα weather routing χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο από πλοίο μεταφοράς εμπορευμάτων και εφόσον εμπορεύματα όπως containers εξακολουθούν να χάνονται στην θάλασσα, το ενδιαφέρον της έρευνας για το weather routing εξακολουθεί να είναι μεγάλο ακόμα και σε ακαδημαϊκό επίπεδο.

## 10. Βιβλιογραφία.

1. Bowditch, N., 2002. The American practical navigator - AN EPITOME OF NAVIGATION. National Imagery and Mapping Agency.
2. Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B., 2007. Maritime Transportation. Elsevier.
3. Denis, M. S., Pierson, W. J., 1953. On the motions of ships in confused seas. In: SNAME
4. dictionary.com, 2014. dictionary.com.  
  
URL <http://dictionary.reference.com/browse/isochrone>
5. Dijkstra, E. W., 1959. A note on two problems in connexion with graphs. Numerische Mathematik 1, 269–271
6. URL [http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim\\_full\\_daily](http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim_full_daily)
7. Faltinsen, O. M., 1990. Sea loads on ships and offshore structures. Cambridge University Press.
8. Fathi, D., 2012. SHIPX Vessel Responses (VERES) Ship Motions and Global Loads. MARINTEK.
9. Gerritsma, J., Beukelman, W., 1972. Analysis of the resistance increase in waves of a fast cargo ship. International Shipbuilding Progress 19, 285–293
10. Hagiwara, H., 1989. Weather routing of (sail-assisted) motor vessels. Ph.D. thesis, TU Delft
11. Haltiner, G. J., Hamilton, H. D., Arnason, G., 1962. Minimal-time ship routing. Journal of Applied Meteorology 1, 1–7.
12. Hinnenthal, J., 2008. Robust Pareto , optimum routing of ships utilizing deterministic and ensemble weather forecasts. Ph.D. thesis, Technischen Universität Berlin.
13. James, R. W., 1957. Application of wave forecasts to marine navigation. Ph.D. thesis, New York University.
14. Kreyszig, E., 2006. Advanced Engineering Mathematics. John Wiley & Sons, INC.
15. Lee, H., Kong, G., Kim, S., Kim, C., Lee, J., 2002. Optimum ship routing and its implementation on the web, 125–137.

16. Lee, W. T., Bales, W. L., Sowby, S. E., 1985. Standardized wind and wave environments for north pacific ocean areas. Tech. rep., David W. Taylor navel ship research and development center.
17. Lloyd, A. R. J. M., 1998. Sea keeping: Ship Behaviour in Rough Weather. A R J M Lloyd.
18. Loukakis, T., Sclavounos, P., 1978. Some extensions of the classical approach to strip theory of ship motions, including the calculation of mean added forces and moments. *Journal of Ship Research* 22, 1–19.
19. Nakamura, S., Naito, S., 1975. Propulsive performance of a container ship in waves. *J.S.N.A. Kansai Japan* 158.
20. Ocean routes.com, 2013. URL <http://www.oceanroutes.com/about.html>
21. Papadakis, N. A., Perakis, A. N., 1990. Deterministic minimal time vessel. *Routing, Operations Research* 28, 426–438.
22. Perakis, A. N., Papadakis, N. A., 1989. Minimal time vessel routing in a time dependent environment. *Transportation Science* 23, 266–276.
23. sea web.com, 2013. URL [http://www.sea-web.com/seaweb\\_welcome.aspx](http://www.sea-web.com/seaweb_welcome.aspx)
24. Shao, W., Zhou, P., Thong, S. K., 2012. Development of a novel forward dynamic programming method for weather routing. *Journal of Marine Science and Technology* 17, 239–251.
25. Steen, S., 2007. Lecture Notes, TMR4247 Marine Technology 3: Resistance and Propulsion. NTNU.
26. Steen, S., Minsaas, K., 2012. Lecture notes, TMR4220 Naval Hydrodynamics: Ship Resistance. NTNU.
27. Steen, S., Minsaas, K., 2013. Lecture Notes, TMR4220 Naval Hydrodynamics: Propeller Theory. NTNU
28. Szlapczynska, J., Smierzchalski, R., 2007. Adopted isochrone method improving ship safety in weather routing with evolutionary approach. *International Journal of Reliability, Quality & Safety Engineering* 14, 635–645.
29. Thomson, K., May 2011. Weather routing. *Meteorological Technology International*, 6–10.
30. Movable Type Scripts URL: <http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>
31. Earth :: a global map of wind, weather, and ocean conditions  
URL: <https://earth.nullschool.net/>