



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ

ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗ

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ 1^η: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΙΣΤΟΥ

Σύστημα Εύρεσης Βέλτιστης Διαδρομής για Πλοία με Χρήση Δεδομένων Καιρού
Μεταπτυχιακή Εργασία

Ηλίας Πέππας

Αθήνα, 2024



HAROKOPIO UNIVERSITY

SCHOOL OF DIGITAL TECHNOLOGY

DEPARTMENT OF INFORMATICS AND TELEMATICS

POSTGRADUATE PROGRAMME IN INFORMATICS AND TELEMATICS

COURSE 1: WEB TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS

Vessel Course Optimization Using Weather Data

Master Thesis

Ilias Peppas

Athens, 2024



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ
ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗ**

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ 1^η: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΙΣΤΟΥ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Ηρακλής Βαρλάμης (Επιβλέπων)

Καθηγητής, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεματικής, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Κωνσταντίνος Τσερπές

**Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεματικής, Χαροκόπειο
Πανεπιστήμιο**

Δημήτριος Μιχαήλ

**Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεματικής, Χαροκόπειο
Πανεπιστήμιο**

Ο Ηλίας Πέππας δηλώνω υπεύθυνα ότι:

- 1) Είμαι ο κάτοχος των πνευματικών δικαιωμάτων της πρωτότυπης αυτής εργασίας και από όσο γνωρίζω η εργασία μου δε συκοφαντεί πρόσωπα, ούτε προσβάλλει τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων.
- 2) Αποδέχομαι ότι η ΒΚΠ μπορεί, χωρίς να αλλάξει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από τη ψηφιακή Βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.
- 3) Όπου υφίστανται δικαιώματα άλλων δημιουργών έχουν διασφαλιστεί όλες οι αναγκαίες άδειες χρήσης ενώ το αντίστοιχο υλικό είναι ευδιάκριτο στην υποβληθείσα εργασία.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη	5
Abstract.....	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	7
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	8
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
Κεφάλαιο 1: Ιστορική αναδρομή	11
Κεφάλαιο 2: Το weather routing σήμερα	14
2.1. Ισόχρονες γραμμές	14
2.2. Δυναμικός προγραμματισμός και λογισμός μεταβολών.....	14
2.3. Αλγόριθμοι εύρεσης μονοπατιού.....	15
2.4. Τεχνητή νοημοσύνη και μηχανική μάθηση	16
Κεφάλαιο 3: Σχετικές εργασίες - Μέθοδοι εξόρυξης δεδομένων για εξαγωγή μοτίβων θαλάσσιας κυκλοφορίας	17
3.1. Εξαγωγή μοτίβων θαλάσσιας κυκλοφορίας μέσω κατανεμημένων συστημάτων	17
3.2. Εξόρυξη τροχιών και χάραξη διαδρομών	25
Κεφάλαιο 4: Αποφυγή επικίνδυνων καιρικών φαινομένων	28
4.1. Χειροκίνητη χάραξη πορείας με το GeolJSON.io	29
4.2. Αποφυγή εμποδίων με χρήση Turf.js.....	31
4.3. Διαχείριση δεδομένων καιρού σε πραγματικό χρόνο μέσω roaming geofences	34
Συμπεράσματα	37
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	38

Περίληψη

Η εύρεση βέλτιστης διαδρομής ανάμεσα σε δύο λιμάνια είναι ένα πρόβλημα το οποίο ακολουθείται πάντα από ένα δεύτερο: τον αστάθμητο παράγοντα του καιρού. Ο πλούτος δεδομένων ναυτιλιακής φύσεως που παρέχει το σύστημα AIS (Automatic Identification System) διευκολύνει τη διαδικασία εξαγωγής κάποιας τροχιάς που προσεγγίζει περισσότερο την έννοια του «βέλτιστου», ωστόσο παραμένει το ζήτημα της αποφυγής πιθανών επικίνδυνων καιρικών συνθηκών. Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι να πραγματοποιήσει μια στοιχειώδη επισκόπηση των προσεγγίσεων που ακολουθήθηκαν για την επίλυση αυτού του προβλήματος κατά το μακρινό, αλλά και πρόσφατο παρελθόν, και να προτείνει τρόπους αποφυγής ενδεχόμενων ζωνών καιρικού κινδύνου μέσω διαφόρων τεχνικών επαναπροσδιορισμού μονοπατιού.

Στην πορεία, πραγματοποιείται μια βιβλιογραφική επισκόπηση με έμφαση σε ακαδημαϊκά άρθρα που έχουν προέλθει από το Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, υλοποιείται σε επίπεδο concept μια απλή εφαρμογή weather routing με χρήση του Turf.js και προτείνεται η χρήση roaming geofences για την περαιτέρω αυτοματοποίηση των ειδοποιήσεων των πλοίων σε περίπτωση δυσμενών καιρικών συνθηκών.

Λέξεις κλειδιά: βέλτιστη διαδρομή, καιρικές συνθήκες, αλγόριθμοι, γεωχωρικά δεδομένα

Abstract

Finding the optimal route between two ports is a problem always followed by a second one: the unpredictable factor of weather. The wealth of data provided by the Automatic Identification System (AIS) facilitates the process of extracting a trajectory that comes closer to the notion of "optimal", however the issue of avoiding potentially dangerous weather conditions remains.

The aim of this thesis is to provide a basic overview of the approaches to the solution of this problem in the distant and recent past and propose ways to avoid potential weather hazard zones through various rerouting techniques.

Along the way, a literature review is conducted with emphasis on academic articles produced by the Harokopio University, a simple weather routing application is implemented at a concept level using Turf.js, and the use of roaming geofences is proposed for further automation of vessel notifications in case of adverse weather conditions.

Keywords: optimal route, weather routing, algorithms, geospatial data

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικ.1. Τα πρώτα βήματα του weather routing (Πηγή: Buckmaster et al., 1960)	σ.12
Εικ.2. Τα βήματα επεξεργασίας που οδηγούν στη δημιουργία των πολυγώνων (Πηγή: Kontopoulos et al., 2020).....	σ.19
Εικ.3. Σύγκριση των δύο υλοποιήσεων του αλγόριθμου DB-Scan (Πηγή: Kontopoulos et al., 2020).....	σ.20
Εικ.4. Τυπικό και μη τυπικό μοτίβο θαλάσσιας κυκλοφορίας (Πηγή: Kontopoulos et al., 2020)	σ.21
Εικ.5. Μεθοδολογία κατανεμημένης επεξεργασίας (Πηγή: Kontopoulos et al., 2020).....	σ.23
Εικ.6. Διαγράμματα κατανομής ταχύτητας και κατεύθυνσης για κάθε τύπο πλοίου (Πηγή: Kontopoulos et al., 2020).....	σ.24
Εικ.7. Δείγμα του τροποποιημένου πλέγματος (Πηγή: Kaklis et al., 2023)	σ.27
Εικ.8. Χειροκίνητη χάραξη τροχιών ανάμεσα από εμπόδια στο GeoJSON.io	σ.30
Εικ.9. Εύρεση βέλτιστου μονοπατιού με GeoJSON και Turf.js	σ.32
Εικ.10. Αποφυγή πολυγώνων-εμποδίων με turf.shortestPath().....	σ.33
Εικ.11. Τα βασικά χαρακτηριστικά των roaming geofences (Πηγή: https://tile38.com/topics/roaming-geofences).....	σ.35

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ΕΛ/ΛΑΚ	Ελεύθερο Λογισμικό/Λογισμικό Ανοικτού Κώδικα
ΣΓΠ	Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών
ΟΤSR	Optimum Track Ship Routing
AIS	Automatic Identification System
GeoJSON	Geographic JavaScript Object Notation
UI	User Interface

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ναυσιπλοΐα αποτέλεσε τον κινητήριο μοχλό της ανάπτυξης του ανθρώπινου πολιτισμού. Παρά την αλματώδη εξέλιξή της όμως από την αρχαιότητα έως σήμερα, εξακολουθεί να βρίσκεται αντιμέτωπη με τα στοιχεία της φύσης. Μπορεί ένα ευμέγεθες τάνκερ να είναι ανθεκτικό σε ισχυρές καταιγίδες, όμως δεν ισχύει το ίδιο για μικρότερα σκάφη, ενώ και οι καθυστερήσεις που μπορεί να προκύψουν έχουν σημαντικές οικονομικές συνέπειες. Όπως την εποχή που ο αρχαίος ναυτικός έψαχνε έδαφος προς αποικισμό, ο σκοπός παραμένει και τώρα ίδιος: η άφιξη στον προορισμό όσο γρηγορότερα και ασφαλέστερα είναι εφικτό.

Σε πρώτη φάση, όπως και τότε, πραγματοποιείται επιλογή της συντομότερης διαδρομής. Τότε υπήρχε ο αστρολάβος και η εμπειρία του αρχαίου ναυτικού, τώρα οι ψηφιακοί χάρτες, τα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης, οι αλγόριθμοι εύρεσης βέλτιστης διαδρομής και το AIS (Automatic Identification System), το σύστημα παρακολούθησης πλοίων που χρησιμοποιεί πομποδέκτες για να εκπέμψει χρήσιμα δεδομένα για την τροχιά τους. Μαζί με την αύξηση και τον εκσυγχρονισμό των διαθέσιμων εργαλείων όμως έχουμε και ευθέως ανάλογη αύξηση της πολυπλοκότητας των απαραίτητων υπολογισμών, αφού πρέπει να ληφθεί υπόψη ένας μεγάλος αριθμός παραγόντων, προβλέψιμων και μη.

Οι προβλέψιμοι παράγοντες περιλαμβάνουν, εκτός των άλλων, τα χαρακτηριστικά του σκάφους (τύπος, μέγεθος, κατανάλωση καυσίμου κτλ.) και τη γεωμορφολογική φύση της διαδρομής (ύπαρξη στεριάς κατά την διαδρομή, σκόπελοι, ύφαλοι). Λαμβάνοντας υπόψη τους παράγοντες αυτούς, σε συνδυασμό με τα δεδομένα που προκύπτουν από το AIS, είναι εφικτές ποικίλες προσεγγίσεις για την εύρεση βέλτιστης διαδρομής, κυρίως μέσω χρήσης των σχετικών αλγόριθμων (Dijkstra, A* search, Bellman-Ford), αλλά και μέσω άλλων τεχνικών.

Η βελτίωση της απόδοσης των αλγόριθμων αυτών ώστε να προσφέρουν ικανοποιητικότερα αποτελέσματα σε ό,τι αφορά τη μείωση της απόστασης των διαδρομών ή την αύξηση της ταχύτητας προσπέλασής τους, αποτελεί βασικό στόχο της ακαδημαϊκής ερευνητικής δραστηριότητας. Για την επίτευξή του συνήθως πραγματοποιείται κάποια τροποποίηση στην υλοποίηση των αλγόριθμων, ώστε να υπάρχει προσαρμογή στα δεδομένα και στις ανάγκες της

ναυσιπλοΐας ή επαναπροσδιορίζεται το πλαίσιο λειτουργίας τους με την ενσωμάτωση έμμεσων παραμέτρων, όπως, για παράδειγμα, η ιστορικότητα των διαδρομών.

Το μη προβλέψιμο ή/και μεταβαλλόμενο τμήμα της διαδικασίας περιλαμβάνει κατά κύριο λόγο τις καιρικές συνθήκες και, δευτερευόντως, τις πιθανές επιθέσεις πειρατικής φύσεως, οι οποίες όμως δύσκολα μπορούν να αντιμετωπιστούν με αλγοριθμικές προσεγγίσεις. Η απρόβλεπτη φύση του καιρού σημαίνει ότι επιβάλλεται η επίλυση του προβλήματος να είναι δυναμικής υπόστασης, να μπορεί δηλαδή να υπάρξει η δυνατότητα έγκαιρης τροποποίησης της βέλτιστης διαδρομής, ώστε να αποφευχθεί ένα επικίνδυνο τμήμα της προδιαγεγραμμένης πορείας.

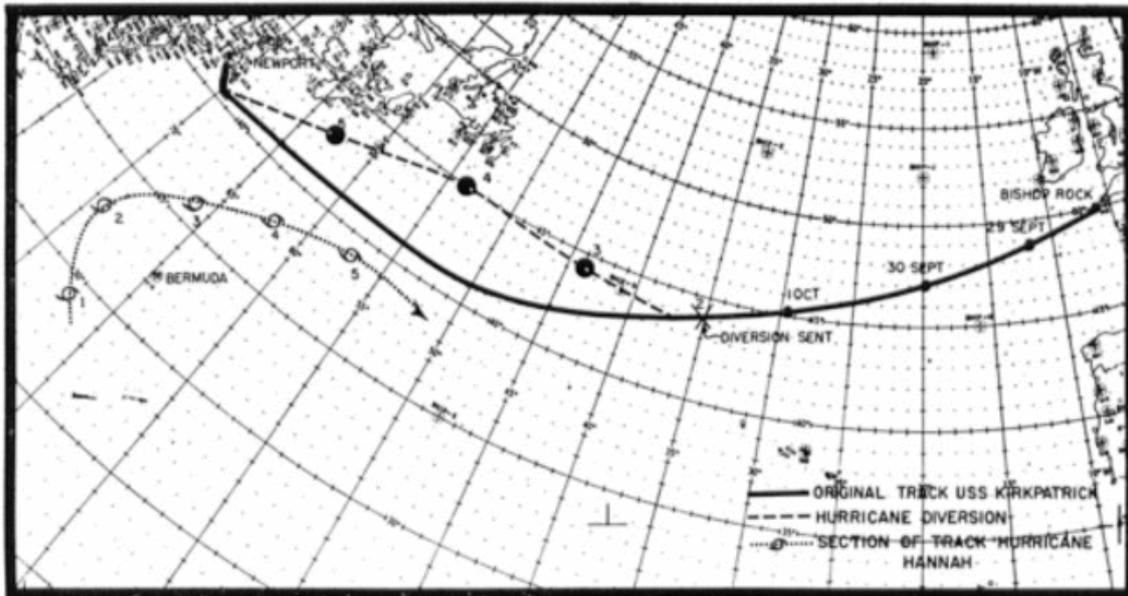
Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο προγραμματιστικά, η χρήση των προαναφερθέντων αλγόριθμων εύρεσης μονοπατιού είναι και πάλι απαραίτητη και ουσιώδης, όμως προκύπτει επιπλέον η ανάγκη για δρομολόγηση εκ νέου. Σε περίπτωση στατικού χωρικά καιρικού φαινομένου μεγάλης διάρκειας, αρκεί η χάραξη νέας διαδρομής που αποφεύγει το φαινόμενο. Ωστόσο, αν πρόκειται, επί παραδείγματι, για έναν τυφώνα που κινείται απρόβλεπτα και με μεγάλη ταχύτητα, η χάραξη νέου βέλτιστου μονοπατιού θα πρέπει να γίνει σχεδόν σε πραγματικό χρόνο, λαμβάνοντας υπόψη τις ταχύτητες και κατευθύνσεις τόσο του σκάφους, όσο και του φαινομένου.

Η ουσία του προβλήματος αυτού έγκειται στην αλληλεπίδραση ανάμεσα στην διαδρομή και στο φυσικό εμπόδιο, όπως αυτό εκφράζεται από τα καιρικά φαινόμενα. Πρακτικά, μία γραμμή με συντεταγμένες (η διαδρομή) θα πρέπει να αποφύγει ένα πολύγωνο με συντεταγμένες (μια, π.χ., καταιγίδα), που ενδέχεται να είναι σχετικά στατικό, αλλά μπορεί και να μεταβάλλεται χωρικά με μεγάλη ταχύτητα. Η γραμμή και το πολύγωνο είναι δομικά στοιχεία των γεωγραφικών δεδομένων, οπότε οι τεχνολογίες που ενσωματώνουν δυνατότητα εισαγωγής και επεξεργασίας γεωχωρικών χαρακτηριστικών δύνανται να φανούν ιδιαίτερα χρήσιμες σε αυτές τις περιπτώσεις.

Κεφάλαιο 1: Ιστορική αναδρομή

Για αιώνες, οι ναυτικοί αντιμετώπιζαν τα στοιχεία της φύσης χωρίς ουσιαστική βοήθεια από τις μετεωρολογικές και ωκεανογραφικές επιστήμες. Αυτό ξεκίνησε να αλλάζει κατά το 1855 με το έργο “Physical Geography of the Seas” του αξιωματικού του Αμερικανικού Ναυτικού Matthew F. Maury, το οποίο περιείχε πολύτιμες πληροφορίες για θαλάσσια ρεύματα, εποχιακούς ανέμους και άλλα επαναλαμβανόμενα καιρικά φαινόμενα. Όπως αναφέρεται στο σχετικό άρθρο των Buckmaster et al. (1960), οι καπετάνιοι χρησιμοποιούσαν το εγχειρίδιο του Maury για να τροποποιήσουν τις διαδρομές τους και να γλιτώσουν από ημέρες έως και μήνες καθυστερήσεων. Η εισαγωγή του μετάλλου και των ατμοκίνητων μηχανών στην κατασκευή πλοίων βελτίωσε τη ναυσιπλοΐα σε συνθήκες υψηλού κυματισμού και ισχυρών ανέμων, όμως, όπως σωστά επισημαίνεται στο ίδιο άρθρο, «ακόμη και το ισχυρότερο σύγχρονο πλοίο οφείλει να κάνει στην άκρη όταν συναντήσει παγόβουνο».

Έναν περίπου αιώνα μετά, η ανάπτυξη της κλιματολογίας και της μετεωρολογίας έδινε πλέον τη δυνατότητα πρόγνωσης του καιρού με ακρίβεια και βάθος χρόνου μεγαλύτερα από εκείνα που επιτυγχάνονταν από την οπτική εκτίμηση και το ένστικτο του βετεράνου ναυτικού. Ως ορόσημο, οι Buckmaster et al. (1960) επισημαίνουν την ανάπτυξη του συστήματος Optimum Track Ship Routing κατά τα τέλη της δεκαετίας του 1950 από τον Dr. Richard W. James του Υδρογραφικού Γραφείου του Πολεμικού Ναυτικού των Ηνωμένων Πολιτειών. Το σύστημα αυτό συνδύαζε την μελέτη των γενικότερων κλιματολογικών χαρακτηριστικών μιας διαδρομής με βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες προγνώσεις καιρού, δίνοντας έμφαση στο ύψος των κυμάτων, αφού ο συγκεκριμένος παράγοντας αναγνωρίστηκε ως εκείνος με την μεγαλύτερη επίδραση στην ταχύτητα και την ασφάλεια των πλοίων. Μετά τον καθορισμό μιας αρχικής διαδρομής με βάση τις υφιστάμενες και αναμενόμενες μετεωρολογικές συνθήκες, ακολουθούσε ο έλεγχός της για αποφυγή πλοήγησης κοντά σε παραλιακές περιοχές ή παγόβουνα και στελνόταν η ολοκληρωμένη προτεινόμενη διαδρομή στον κυβερνήτη του εκάστοτε πλοίου μέσω των ναυτικών καναλιών επικοινωνίας της περιοχής. Από τη στιγμή της έναρξης μέχρι και τον τερματισμό του ταξιδιού, οι συνθήκες της διαδρομής εξακολουθούσαν να ελέγχονται και αν προέκυπτε κάποια προτιμητέα εναλλακτική πορεία, ο κυβερνήτης του πλοίου ενημερωνόταν αναλόγως.



Weather Routing of Ships by the U. S. Navy

LCDR. A. T. BUCKMASTER, USN; LCDR. H. W. ALBERS, USN;
 E. M. BALLEZWEIG AND J. F. MILLER, *Fleet Weather
 Facility, Norfolk, Virginia*

Εικόνα 1: Τα πρώτα βήματα του weather routing (Πηγή: Buckmaster at al., 1960)

Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα επιτυχημένης εφαρμογής του OTSR αναφέρεται το ταξίδι του αμερικανικού πολεμικού σκάφους U.S.S. Kirkpatrick από την Κοπεγχάγη της Δανίας στο Newport του Rhode Island των ΗΠΑ κατά το φθινόπωρο του 1959. Όσο το πλοίο κινούνταν στον Βόρειο Ατλαντικό επί της προκαθορισμένης πορείας του, κατέστη ξεκάθαρο ότι ο τυφώνας Hannah επρόκειτο να πλησιάσει το σκάφος επικίνδυνα. Ύστερα από προσεκτική ανάλυση της πιθανής πορείας του τυφώνα, εστάλη στον κυβερνήτη του U.S.S. Kirkpatrick μια εναλλακτική διαδρομή. Ο κυβερνήτης του σκάφους έλαβε σοβαρά υπόψη την πρόταση αυτή, σε συνδυασμό με τα εναπομείναντα καύσιμα, τη φύση της αποστολής του και άλλους επιχειρησιακούς παράγοντες και άλλαξε όντως πορεία, με αποτέλεσμα το σκάφος να φτάσει στον προορισμό του με ασφάλεια.

Το άρθρο πραγματοποιεί στο τέλος έναν σύντομο απολογισμό της αποτελεσματικότητας του OTSR και διερευνά τα περιθώρια βελτίωσης του συστήματος, δίνοντάς μας μία διστακτική ματιά στο παρόν μέσω της αναφοράς στην χρήση «μη δοκιμασμένων τεχνικών, που περιλαμβάνουν τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών για την υλοποίηση λεπτομερέστερων προγνωστικών μεθόδων» (Buckmaster at al., 1960). Παράλληλα, αναφέρεται ότι το Naval Weather Research Facility των ΗΠΑ είχε ήδη ξεκινήσει τη μελέτη της χρήσης της Πληροφορικής στον καθορισμό της συντομότερης διαδρομής.

Κεφάλαιο 2: Το weather routing σήμερα

Εξήντα χρόνια μετά, η εύρεση βέλτιστης διαδρομής με δεδομένα καιρού έχει αναπτυχθεί σε σημαντικό βαθμό και αποτελεί αντικείμενο συνεχούς έρευνας από πολλαπλά επιστημονικά πεδία και βιομηχανικούς κλάδους. Η βιβλιογραφική επισκόπηση των Zis et al. (2020) παρέχει μια εποπτική επισκόπηση των πεπραγμένων και εντοπίζει μια ποικιλία τεχνικών, που δεν περιορίζονται μόνο στις αλγοριθμικές.

2.1. Ισόχρονες γραμμές

Η μέθοδος των ισοχρόνων είναι η παλαιότερη από τις σύγχρονες τεχνικές weather routing και αναλύθηκε από τους Hanssen and James (1960). Οι ισόχρονες είναι γραμμές που αναπαρίστανται σε ένα πλέγμα (grid) και κάθε μία από αυτές αντιπροσωπεύει μία διαφορετική πιθανή τροχιά ενός πλοίου που έχει τον ίδιο χρόνο ταξιδιού. Ο Hagiwara (1989) επέκτεινε την αρχική θεωρία, εισάγοντας την επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων. Η τροποποίηση αυτή αναγνωρίζει ότι οι ισόχρονες γραμμές μπορούν να μεταβάλλονται ως προς το μήκος τους λόγω των καιρικών συνθηκών, επιτρέποντας έτσι τη διέλευση διαφορετικών αποστάσεων εντός του ίδιου χρονικού διαστήματος.

Η πιο πρόσφατη εξέλιξη στον τομέα είναι η πρόταση από τους Lin et al. (2013) μιας τρισδιάστατης μεθόδου ισόχρονων, γνωστής και ως 3DMI, η οποία λαμβάνει υπόψη τις μεταβολές όχι μόνο στον καιρό, αλλά και στο βάθος της θάλασσας.

2.2. Δυναμικός προγραμματισμός και λογισμός μεταβολών

Η μέθοδος του δυναμικού προγραμματισμού βασίζεται στην αρχή βελτιστοποίησης του Bellman (1952), στο πλαίσιο της οποίας ένα πρόβλημα διασπάται σε επιμέρους τμήματα και, μετά την πρώτη απόφαση, όλες οι υπόλοιπες αποφάσεις οφείλουν να είναι βέλτιστες (Bellman, 1952). Στη ναυτιλία ο δυναμικός προγραμματισμός χρησιμοποιήθηκε από τους Zorropoli (1972), Chen

(1978) και Wang (1993) για τον προσδιορισμό βέλτιστων διαδρομών, ενώ οι Shao et al. (2011) πρότειναν τη μέθοδο 3DDP (3-Dimensional Dynamic Programming), που λαμβάνει υπόψη τις ρυθμίσεις ισχύος και την πορεία του πλοίου, σε συνδυασμό με τον χρόνο και τη γεωγραφική θέση για να ελαχιστοποιήσει την κατανάλωση καυσίμων σε ένα ταξίδι.

Μια εναλλακτική προσέγγιση προκύπτει από την χρήση του λογισμού μεταβολών, που προτάθηκε αρχικά από τους Haltiner και Hamilton (1962) και λαμβάνει υπόψη της κυρίως το ύψος και την κατεύθυνση των κυμάτων για την ελαχιστοποίηση του χρόνου ταξιδιού. Οι Perakis και Papadakis χρησιμοποίησαν εκτεταμένα τον λογισμό μεταβολών, χρησιμοποιώντας ως μεταβλητές ελέγχου τις ρυθμίσεις ισχύος και την πορεία (Papadakis and Perakis, 1989), ενώ ανέπτυξαν μεθοδολογίες για την ελαχιστοποίηση χρόνου λαμβάνοντας υπόψη χερσαία εμπόδια και απαγορευμένες περιοχές πλεύσης (Papadakis and Perakis, 1990).

2.3. Αλγόριθμοι εύρεσης μονοπατιού

Σύμφωνα με τους Zis et al. (2020), οι αλγόριθμοι εύρεσης μονοπατιού που εφαρμόζονται με μεγαλύτερη συχνότητα είναι οι αλγόριθμοι Dijkstra και A*. Ενδεικτικά, ο Dijkstra έχει χρησιμοποιηθεί από τους Radhy et al. (2008) σε μελέτες περίπτωσης στον Βόρειο Ινδικό Ωκεανό, ενώ ο A* έχει χρησιμοποιηθεί από τον Szlapczynska (2015). Οι Mannarini et al. (2013) παρουσίασαν ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων για βέλτιστες διαδρομές πλοίων το οποίο θα μπορούσε να εκμεταλλευτεί μετεωρολογικά και ωκεανογραφικά δεδομένα για υπολογισμό των περιβαλλοντικών παραγόντων και χρησιμοποιεί μια τροποποιημένη έκδοση του αλγόριθμου του Dijkstra για την επιλογή βέλτιστης διαδρομής. Οι Simonsen et al. (2015) ανέλυσαν διάφορους αλγόριθμους σχετικούς με weather routing και παρουσίασαν τον δικό τους αλγόριθμο εύρεσης βέλτιστου μονοπατιού, με τίτλο "DIRECT", ο οποίος εστιάζει στο να μειώσει την κατανάλωση καυσίμου. Ανάμεσα στις υπόλοιπες μελέτες που αναφέρουν οι Zis et al. (2020), ενδιαφέρον παρουσιάζει η συγκριτική ανάλυση του Roh (2013) ανάμεσα στην μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών και τον αλγόριθμο A*, η οποία καταλήγει στο ότι η πρώτη από τις δύο παρουσιάζει καλύτερη απόδοση.

2.4. Τεχνητή νοημοσύνη και μηχανική μάθηση

Σχετικά πρόσφατα άρχισε να διεξάγεται εκτεταμένη έρευνα σχετικά με τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης με σκοπό τη βελτίωση της κατανάλωσης καυσίμων, την πρόβλεψη ταχυτήτων πλεύσης και τον σχεδιασμό βέλτιστων διαδρομών. Το μεγαλύτερο ποσοστό της σχετικής έρευνας χρησιμοποιεί νευρωνικά δίκτυα και μεθόδους μηχανικής μάθησης για να προβλέψει την κατανάλωση καυσίμων κάτω από διαφορετικές συνθήκες πλεύσης, ώστε να πραγματοποιηθεί βελτιστοποίηση των ταξιδιών, είτε με βάση την μείωση της κατανάλωσης καυσίμων, είτε με βάση την έγκαιρη άφιξη.

Η πρώτη σχετική έρευνα που αναφέρεται από τους Zis et al. (2020) είναι εκείνη των Wang et al. (2016), οι οποίοι χρησιμοποιούν ένα νευρωνικό δίκτυο κυματιδίων (wavelet) και αναπτύσσουν ένα μοντέλο βελτιστοποίησης ενεργειακής απόδοσης σε πραγματικό χρόνο, για να καθορίσουν τη βέλτιστη ταχύτητα μηχανής κάτω από διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, λαμβάνοντας υπόψη και περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η ταχύτητα του ανέμου και το βάθος της θάλασσας. Οι Mao et al. (2016) χρησιμοποιούν πληροφορίες καιρού (ύψος κύματος, περίοδος κύματος, ταχύτητα ανέμου) και δεδομένα για τις στροφές ανά λεπτό (RPM) της κύριας μηχανής ενός εμπορικού πλοίου για να προβλέψουν την ταχύτητα πλεύσης με τρία διαφορετικά στατιστικά μοντέλα (αυτοπαλινδρόμηση, εκτιμήσεις ελαχίστων τετραγώνων, μέγιστη πιθανοφάνεια).

Το άρθρο αναφέρει αρκετές ακόμη σχετικές έρευνες που κατά κύριο λόγο ασχολούνται με την πρόβλεψη της κατανάλωσης καυσίμων, με σκοπό τη βελτίωσή της και καταλήγει στην προσπάθεια των Gkerekos and Lazakis (2020), οι οποίοι χρησιμοποιούν ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο για την πρόβλεψη της κατανάλωσης καυσίμου σε ένα πλοίο, και στη συνέχεια χρησιμοποιούν μια ευρετική μέθοδο που βασίζεται στον αλγόριθμο του Dijkstra για να σχεδιάσουν τη βέλτιστη διαδρομή χρησιμοποιώντας τις προβλέψεις κατανάλωσης καυσίμου σε διάφορα σημεία.

Κεφάλαιο 3: Σχετικές εργασίες - Μέθοδοι εξόρυξης δεδομένων για εξαγωγή μοτίβων θαλάσσιας κυκλοφορίας

Το σύστημα AIS (Automatic Identification System) είναι, από το 2002 και έπειτα, ο βασικός τροφοδότης δεδομένων ναυσιπλοΐας, παρέχοντας, εκτός των άλλων, πληροφορίες για γεωγραφικό πλάτος και μήκος, πορεία, ταχύτητα και άλλα. Η ύπαρξή του διευκολύνει σε πολύ μεγάλο βαθμό την προσπάθεια για την εύρεση βέλτιστων μονοπατιών, αφού πλέον διατίθενται όλα τα απαραίτητα δεδομένα ώστε να γίνει αποδοτική χρήση των τεχνικών που προαναφέρθηκαν.

Το ίδιο το Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο έχει συνεισφέρει στην προσπάθεια εξαγωγής ναυτιλιακών μοτίβων κίνησης με χρήση δεδομένων από AIS μέσω επιστημονικών άρθρων, δύο εκ των οποίων θα αναλυθούν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Το πρώτο από αυτά (Kontopoulos et al., 2020), περιγράφει την εξαγωγή ναυτιλιακών μοτίβων κίνησης μέσω κατανεμημένων συστημάτων, ενώ το δεύτερο (Kaklis et al., 2023) εξάγει μοτίβα κίνησης με χρήση ιστορικών δεδομένων AIS και εφαρμόζει αλγόριθμο A* επάνω σε αυτά τα μοτίβα, με ιδιαίτερα ενθαρρυντικά αποτελέσματα.

3.1. Εξαγωγή μοτίβων θαλάσσιας κυκλοφορίας μέσω κατανεμημένων συστημάτων

Οι Kontopoulos et al. (2020) προχώρησαν στη χρήση διαφόρων τεχνικών επεξεργασίας δεδομένων, ώστε να διαχειριστούν και να ερμηνεύσουν την εκτεταμένη ποσότητα και την ενίοτε θορυβώδη φύση των δεδομένων που προκύπτουν από το AIS. Για την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το Apache Spark, μία μηχανή επεξεργασίας δεδομένων μεγάλης κλίμακας (Big Data), που επιτρέπει την αποδοτική και γρήγορη κατανεμημένη επεξεργασία δεδομένων. Απώτερος σκοπός ήταν η εξαγωγή μοτίβων κίνησης που θα αποτελούσε τη βάση για τον εντοπισμό ασυνήθιστων συμπεριφορών πλοίων.

Όπως αναφέρεται και στην εισαγωγή του άρθρου, πραγματοποιείται μια σειρά συνεισφορών στην βιβλιογραφία. Η πρώτη από αυτές είναι ότι η συγκεκριμένη εργασία τροποποιεί τον ορισμό της απόστασης στον αλγόριθμο συσταδοποίησης DB-Scan, λαμβάνοντας υπόψη ταυτόχρονα την

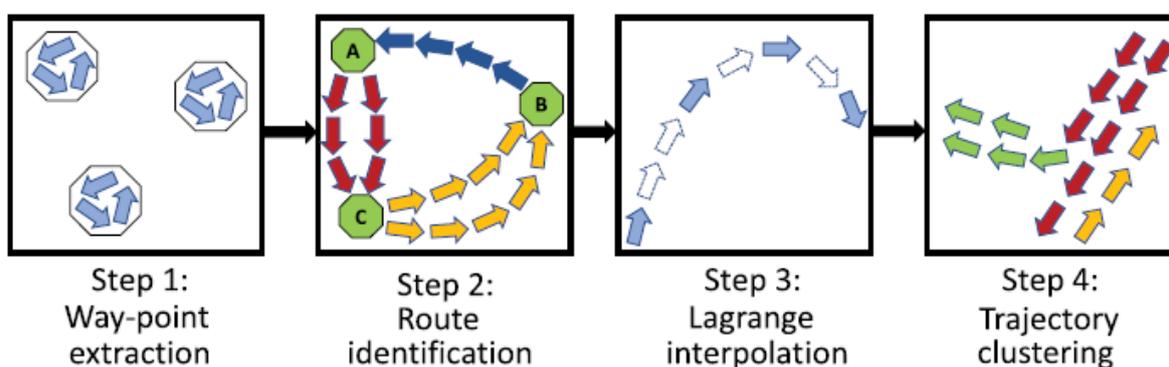
ταχύτητα, την πορεία και τη θέση των σημείων τροχιάς. Η δεύτερη έγκειται στο ότι παρέχεται μία κατανεμημένη υλοποίηση της προτεινόμενης λύσης, η οποία επιτρέπει ένα πιο αποδοτικό πλαίσιο επεξεργασίας ως προς την εκμετάλλευση τυπικών συμπεριφορών πλοήγησης, κατασκευάζοντας μοντέλα κίνησης για διαφορετικές περιοχές και τύπους σκαφών και χρησιμοποιώντας τα για τον εντοπισμό αποκλίσεων από τα μοντέλα αυτά. Η τρίτη συνεισφορά είναι η δημιουργία ενός μοντέλου κίνησης που μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά τόσο με αραιά όσο και με πυκνά δεδομένα. Στην πρώτη περίπτωση περιλαμβάνονται τα σκάφη που δεν εκπέμπουν συχνά τη θέση τους λόγω διαφόρων περιορισμών, όπως ο καιρός, και στη δεύτερη θαλάσσιες περιοχές με συχνές διελεύσεις σκαφών. Τέλος, το μοντέλο κίνησης που προτείνεται, είναι σε θέση να εξαγάγει μοτίβα κίνησης σε ικανοποιητικό βαθμό ακόμη και σε περιοχές με πολλά νησιά, όπως το Αιγαίο.

Με βάση τα γραφόμενα του άρθρου, για να παρουσιαστεί η χρήση του προτεινόμενου πλαισίου στην επιτήρηση των θαλάσσιων περιοχών, έγινε εφαρμογή σε ένα dataset που περιέχει δεδομένα AIS από έναν μόνο τύπο πλοίων (π.χ. φορτηγά πλοία). Η μεθοδολογία για την εξαγωγή μοτίβων θαλάσσιας κυκλοφορίας μπορεί να είναι η ίδια, όμως επειδή τα πλοία διαφορετικού τύπου μπορεί επιπλέον να διαφέρουν σε μέγεθος και σχήμα, τα μοτίβα που προκύπτουν μπορεί να διαφέρουν ανά τύπο πλοίου. Παρόλο που η μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές και χρονικές περιόδους, επιλέχθηκε ένα dataset που καλύπτει περίοδο λίγων μηνών και αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος.

Σειρά έχει το preprocessing των δεδομένων, το οποίο πραγματοποιείται σε τέσσερα στάδια: την εξαγωγή σημείων αναφοράς, την αναγνώριση διαδρομών, την παρεμβολή Lagrange και την ομαδοποίηση τροχιών. Μετά την ολοκλήρωση και των τεσσάρων βημάτων, θα έχει επιτευχθεί η αφαίρεση θορύβου από το dataset και η δημιουργία νοητών γεωγραφικών οντοτήτων στη θάλασσα με τη μορφή πολυγώνων, που θα υποδεικνύουν τα μοτίβα κίνησης των πλοίων.

Σε αρχική φάση, λοιπόν, εξαγονται τα σημεία αναφοράς ή σημεία στάσης (waypoints), τα οποία ορίζονται ως περιοχές στη θάλασσα όπου τα πλοία σταματούν εντελώς, υποδεικνύοντας την ύπαρξη λιμανιού ή σημείου αγκυροβόλησης. Με την αναγνώριση αυτών των σημείων μπορούν να καθοριστούν οι αρχικές και τελικές θέσεις των διαδρομών. Για τον εντοπισμό τους αρκεί να βρεθούν οι θέσεις όπου η τιμή της ταχύτητας που αναφέρεται από το AIS είναι μηδενική. Μετά

χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος DB-Scan για να προχωρήσει σε συσταδοποίηση θέσεων μεγάλης πυκνότητας που βρίσκονται κοντά η μία στην άλλη και να αφαιρεθούν τα outliers, δηλαδή θέσεις με μηδενική ταχύτητα που δεν συμπίπτουν με λιμάνια ή σημεία αγκυροβόλησης, που μπορεί να έχουν προκύψει από σφάλμα του GPS. Έπειτα, τα clusters (συστάδες) που προκύπτουν μετατρέπονται σε κυρτά περιβλήματα (convex hulls), στις ελάχιστες δηλαδή γεωμετρικές μονάδες που περιέχουν όλα τα σημεία ενός cluster. Τα τελικά κυρτά περιβλήματα χρησιμοποιούνται ως σημεία αναφοράς.



Εικόνα 2: Τα βήματα επεξεργασίας που οδηγούν στη δημιουργία των πολυγώνων (Πηγή: Kontopoulos et al., 2020)

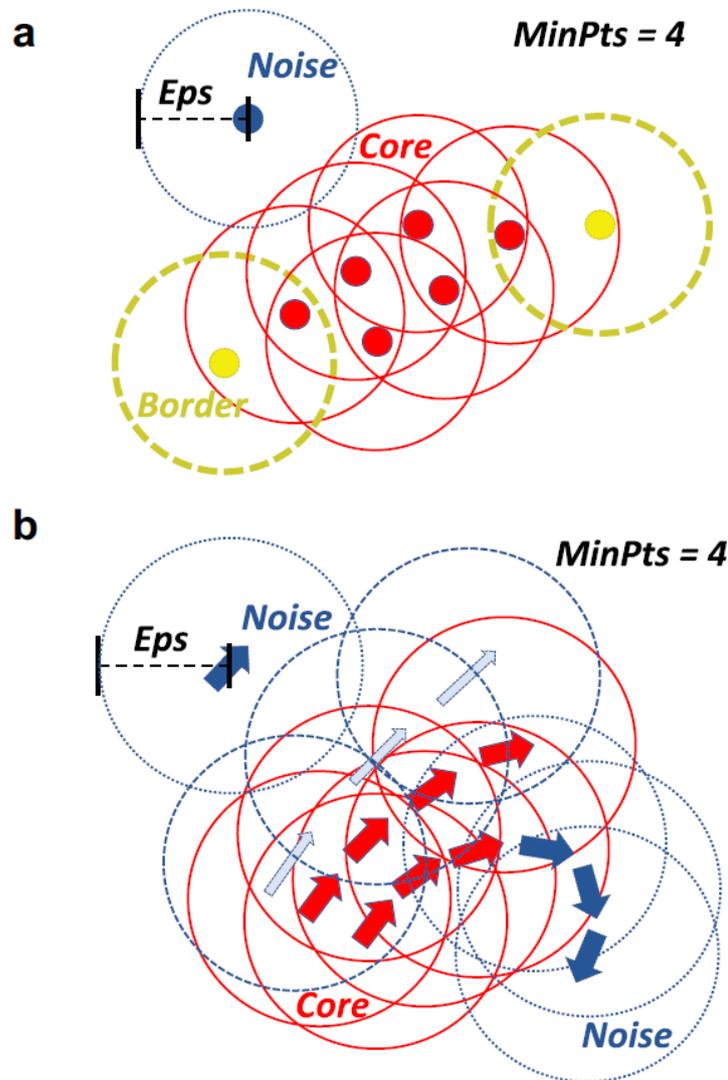
Ακολουθεί το βήμα αναγνώρισης διαδρομής, που συντελείται μέσω της τμηματοποίησής της. Στο πλαίσιο αυτό, οι πλήρεις τροχιές αναπαρίστανται ως ακολουθίες υποδιαδρομών, καθεμία από τις οποίες συνδέει ένα ζευγάρι ενδιάμεσων σημείων αναφοράς, στην πορεία από το σημείο αναφοράς του λιμένα προέλευσης προς τον προορισμό.

Οι τροχιές που προκύπτουν από τα προαναφερθέντα βήματα είναι πολλές φορές ελλιπείς, γι' αυτό και η επόμενη φάση επεξεργασίας περιλαμβάνει την ανακατασκευή τους με τη χρήση πολυωνυμικής παρεμβολής Lagrange.

Τέλος, εισάγεται μια παραλλαγή του αλγόριθμου DB-Scan που εξετάζει τις αποστάσεις, ή διαφορές, χώρου, ταχύτητας και κατεύθυνσης για να εντοπίσει γειτονικά σημεία και έτσι να ομαδοποιήσει υποδιαδρομές που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση και έχουν παρόμοιες ταχύτητες και κατευθύνσεις. Όπως προαναφέρθηκε, η προσέγγιση αυτή διαφέρει σε σχέση με την τυπική υλοποίηση του DB-Scan, αφού λαμβάνονται υπόψη η ταχύτητα, η κατεύθυνση και η

θέση του εκάστοτε πλοίου, σε αντίθεση με την παραδοσιακή υλοποίηση του αλγόριθμου, όπου ως κριτήριο εγγύτητας λαμβάνεται υπόψη μόνο η θέση δύο σημείων.

Το μοντέλο θαλάσσιας κυκλοφορίας που προκύπτει, περιλαμβάνει σημεία αναφοράς (κορυφές) που ομαδοποιούν τα σημεία στάσης ή στροφής πολλαπλών σκαφών και ομάδες υποδιαδρομών (ακμές) που περιέχουν στατιστικά στοιχεία που εξάγονται από όλα τα πλοία που έπλευσαν από το ένα σημείο αναφοράς στο άλλο. Τα στατιστικά στοιχεία των ακμών αντιπροσωπεύουν τους προτιμώμενους τρόπους πλεύσης μεταξύ δύο σημείων αναφοράς. Το εξαγόμενο αποτέλεσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον τομέα της ανίχνευσης ασυνήθιστης συμπεριφοράς πλοίων.



Εικόνα 3: Σύγκριση των δύο υλοποιήσεων του αλγόριθμου DB-Scan (Πηγή: Kontopoulos et al., 2020)

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι πριν από την εφαρμογή του τροποποιημένου αλγορίθμου DB-Scan, η περιοχή επιτήρησης χωρίζεται σε πλακίδια (tiles) ανάλυσης 0,2 degrees. Η επιλογή αυτής της ανάλυσης του πλέγματος (grid) έγινε επειδή οι περισσότερες μετεωρολογικές υπηρεσίες χρησιμοποιούν την ίδια ανάλυση. Κατά συνέπεια, η διαλειτουργικότητα με τέτοιες υπηρεσίες είναι ευκολότερη, επιτρέποντας την περαιτέρω επέκταση της συγκεκριμένης προσέγγισης στο μέλλον. Για παράδειγμα, κάθε πλακίδιο θα μπορούσε να εμπλουτιστεί με μετεωρολογικές πληροφορίες για την εξήγηση μη αναμενόμενης συμπεριφοράς στην κίνηση των σκαφών.



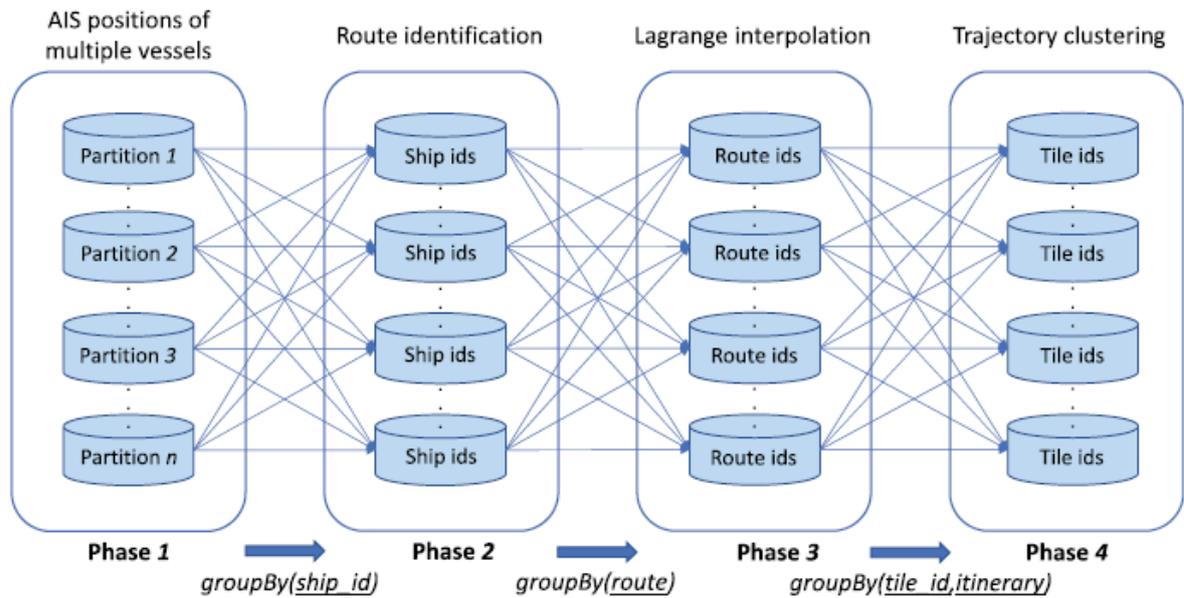
Εικόνα 4: Τυπικό και μη τυπικό μοτίβο θαλάσσιας κυκλοφορίας (Πηγή: Kontopoulos et al., 2020)

Τέλος, μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας συσταδοποίησης (clustering) των τροχιών, οι συστάδες μετατρέπονται σε κυρτά περιβλήματα (convex hulls). Το αποτέλεσμα είναι ένα σύνολο

κυρτών περιβλημάτων, καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύεται από το δρομολόγιο στο οποίο ανήκει. Επομένως, κάθε δρομολόγιο μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένα σύνολο κυρτών περιβλημάτων που υποδεικνύουν τα χωρικά όρια εντός των οποίων πρέπει να κινούνται τα σκάφη όταν ακολουθούν το δρομολόγιο στο οποίο ανήκουν. Επιπλέον, κάθε κυρτό περίβλημα περιέχει στατιστικά στοιχεία για την ταχύτητα και την κατεύθυνση, τα οποία αντιπροσωπεύουν τα όρια μέσα στα οποία έχει νόημα να κινηθούν τα σκάφη. Οποιαδήποτε απόκλιση από αυτά τα χωρικά/συμπεριφορικά όρια αποτελεί ανωμαλία που απαιτεί περαιτέρω προσοχή και εξέταση από τις αρχές.

Οι προαναφερθείσες διεργασίες είναι ιδιαίτερα απαιτητικές από άποψης υπολογιστικής ισχύος, τόσο λόγω της τεράστιας ποσότητας δεδομένων που προκύπτουν από το AIS, όσο και λόγω των αυξημένων απαιτήσεων του αλγόριθμου DB-Scan σε υπολογιστικούς πόρους (επεξεργαστή και μνήμη). Για τον λόγο αυτό, η υλοποίηση που περιγράφει το άρθρο πραγματοποιήθηκε εξ ολοκλήρου στην πλατφόρμα Apache Spark, ένα ιδιαίτερα διαδεδομένο MapReduce framework κατανεμημένης επεξεργασίας, το οποίο επιτρέπει την επεξεργασία δεδομένων μεγάλης κλίμακας (Big Data) στην μνήμη, γεγονός που αυξάνει την απόδοση.

Η μεθοδολογία που ακολούθησαν οι Kontopoulos et al. (2020) χωρίζεται σε τέσσερις φάσεις. Αρχικά, τα ιστορικά δεδομένα από το AIS κατανέμονται σε n partitions. Έπειτα, για να εξαχθούν οι διαδρομές κάθε τροχιάς και να εκτελεστεί παράλληλα ο αλγόριθμος αναγνώρισης διαδρομής, τα δεδομένα ομαδοποιούνται κατά το αναγνωριστικό πλοίου (ship id). Επομένως, ένα partition περιέχει όλα τα δεδομένα AIS που αντιστοιχούν στην ίδια τροχιά ή αναγνωριστικό πλοίου. Επιπλέον, ένα partition μπορεί να περιέχει μία ή περισσότερες τροχιές. Αφού ολοκληρωθεί η δεύτερη φάση και κάθε τροχιά χωριστεί σε υποτροχιές ή διαδρομές, εφαρμόζεται παρεμβολή Lagrange σε κάθε διαδρομή (φάση 3). Για το σκοπό αυτό, τα δεδομένα ομαδοποιούνται τώρα κατά το αναγνωριστικό διαδρομής (route id), το οποίο επιτρέπει καλύτερη εκ νέου εξισορρόπηση των δεδομένων, αφού οι τροχιές δεν τμηματοποιούνται σε ίσο αριθμό τμημάτων. Στη συνέχεια, κάθε θέση AIS αντιστοιχίζεται σε έναν χωρικό δείκτη ή αναγνωριστικό πλακιδίου (tile id). Κάθε αναγνωριστικό πλακιδίου μπορεί να περιέχει ένα ή περισσότερα δρομολόγια, επομένως, τα δεδομένα ομαδοποιούνται τώρα κατά ζεύγη αναγνωριστικού πλακιδίου/δρομολογίου προκειμένου να εφαρμοστεί ο τροποποιημένος αλγόριθμος DB-Scan σε κάθε ζεύγος (φάση 4).



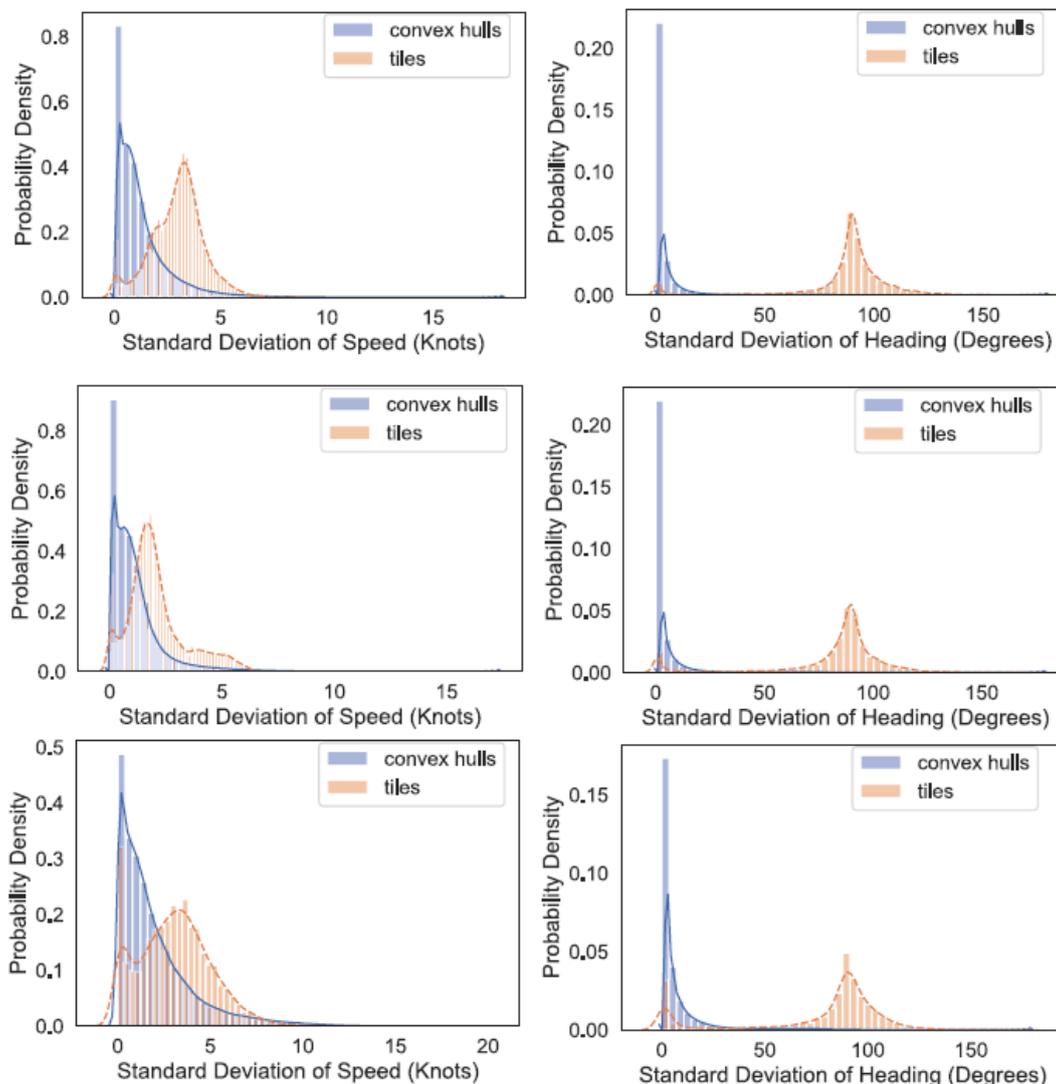
Εικόνα 5: Μεθοδολογία κατανεμημένης επεξεργασίας (Πηγή: Kontopoulos et al., 2020)

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παράλληλη επεξεργασία αρκετών χιλιάδων ή αρκετών εκατομμυρίων αλγορίθμων DB-Scan. Ο αριθμός των αλγορίθμων DB-Scan εξαρτάται από τον αριθμό των πλακιδίων και τον αριθμό των δρομολογίων ανά πλακίδιο. Τέλος, αφού σχηματιστούν οι συστάδες (clusters), κάθε συστάδα μετατρέπεται σε κυρτό περιβλήμα.

Η πειραματική εκτίμηση του όλου εγχειρήματος έλαβε χώρα σε τέσσερις τετραπύρηνους υπολογιστές. Αρχικά εκτιμήθηκε ο βαθμός ακρίβειας στον οποίο το μοντέλο ήταν ικανό να αντιπροσωπεύει μοτίβα θαλάσσιας κυκλοφορίας. Για να επιτευχθεί αυτό, μετρήθηκε το ποσοστό των θέσεων AIS των δεδομένων του τεστ που εντοπίζονταν μέσα στα κυρτά περιβλήματα και το αποτέλεσμα ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικό, αφού και στους τρεις τύπους πλοίων που εξετάστηκαν (τάνκερ, εμπορικά, επιβατικά) η ακρίβεια που επιτεύχθηκε ήταν της τάξεως του 94% και άνω.

Δευτερευόντως, εκτιμήθηκε το πόσο συμπαγή ή συμπυκνωμένα (compact) ήταν τα κυρτά περιβλήματα. Για τον λόγο αυτό, συγκρίθηκε η υφιστάμενη μεθοδολογία με μια βασική προσέγγιση η οποία αντί να χρησιμοποιεί clusters και κυρτά περιβλήματα, χρησιμοποιεί μόνο τα στατιστικά στοιχεία που εξάγονται ανά πλακίδιο της περιοχής επιτήρησης. Για να επιδειχθεί ότι τα στατιστικά στοιχεία των κυρτών περιβλημάτων είναι πιο αντιπροσωπευτικά της κίνησης

των πλοίων και πιο συμπαγή, μετρήθηκε η τυπική απόκλιση της ταχύτητας και της κατεύθυνσης των θέσεων AIS που περιέχουν. Ομοίως, μετρήθηκε η τυπική απόκλιση των ίδιων χαρακτηριστικών των θέσεων AIS που περιέχονται σε κάθε πλακίδιο.



Εικόνα 6: Διαγράμματα κατανομής ταχύτητας και κατεύθυνσης για κάθε τύπο πλοίου (Πηγή: Kontopoulos et al., 2020)

Παρατηρήθηκε ότι οι τυπικές αποκλίσεις των κυρτών περιβλημάτων συγκεντρώνονται προς τα αριστερά, γεγονός που υποδεικνύει χαμηλότερες τιμές για τις αποκλίσεις. Από την άλλη πλευρά, οι τυπικές αποκλίσεις των πλακιδίων τείνουν να βρίσκονται στη μέση των σχημάτων, γεγονός που υποδηλώνει μεγαλύτερες τιμές τυπικών αποκλίσεων. Έτσι, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι τα κυρτά περιβλήματα είναι πιο συμπαγή και ότι οι θέσεις AIS που βρίσκονται μέσα σε αυτά έχουν παρόμοια ταχύτητα και κατεύθυνση.

3.2. Εξόρυξη τροχιών και χάραξη διαδρομών

Το AIS αποτελεί αναμενόμενα την πηγή δεδομένων και του δεύτερου εξεταζόμενου επιστημονικού άρθρου του Χαροκοπέιου Πανεπιστημίου, από τους Kaklis et al. (2023). Η προτεινόμενη προσέγγιση σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιεί ιστορικά δεδομένα διαδρομών πλοίων για την εξόρυξη ναυτικών μοτίβων και εφαρμόζει τον αλγόριθμο αναζήτησης A* επάνω σε αυτά τα μοτίβα. Τα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η προσέγγιση αυτή είναι σε θέση να οδηγήσει σε κοντινότερες διαδρομές πλοίων σε σχέση με άλλες μεθόδους, οδηγώντας σε μειώσεις κόστους για τον ναυτιλιακό τομέα.

Η διαδικασία, ως είθισται, ξεκινάει με τη συλλογή των δεδομένων. Τα δεδομένα του AIS συλλέγονται από πομπούς που βρίσκονται στα σκάφη και συγχρονίζονται με τους κοντινότερους σταθμούς AIS σε τακτά χρονικά διαστήματα. Τα δεδομένα περιλαμβάνουν τις συντεταγμένες του εκάστοτε σκάφους, την ταχύτητα και την κατεύθυνσή του. Το dataset που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκεκριμένη μελέτη προέρχεται από περίπου 10^4 διαδρομές μετ' επιστροφής εμπορικών πλοίων στη Μεσόγειο.

Η διαδικασία του preprocessing των δεδομένων είναι αντίστοιχη με εκείνη του άρθρου των Kontopoulos et al. (2020) και αποτελείται από τα ίδια τέσσερα στάδια: την εξαγωγή σημείων αναφοράς, την αναγνώριση διαδρομών, την παρεμβολή Lagrange και την ομαδοποίηση τροχιών μέσω του αλγόριθμου DB-Scan.

Το τελευταίο στάδιο του preprocessing είναι και εδώ η συσταδοποίηση τροχιών πολλαπλών σκαφών που ακολουθούν τις ίδιες διαδρομές. Για την υλοποίηση αυτού του βήματος χρησιμοποιείται ένα πλέγμα (grid), σε κάθε κυψέλη (cell) του οποίου υπολογίζεται η τυπική απόκλιση για την ταχύτητα, την πορεία και την απόσταση, ώστε να προκύψουν οι τιμές με τη μικρότερη διασπορά και να ομαδοποιηθούν. Ακολουθεί η εφαρμογή μιας τροποποιημένης έκδοσης του αλγόριθμου DB-Scan, που ομαδοποιεί περαιτέρω τις θέσεις κάθε σκάφους όπως προκύπτουν από το AIS και τα σημεία εκκίνησης και προορισμού σε κάθε κυψέλη του πλέγματος. Μετά και τον υπολογισμό των κυρτών περιβλημάτων ανά cluster προκύπτουν πολυάριθμα πολύγωνα κατά μήκος κάθε διαδρομής, κάθε ένα από τα οποία αντιπροσωπεύει την συγκεκριμένη περιοχή όπου τα σκάφη είχαν παρόμοιες ταχύτητες και κατευθύνσεις.

Μετά την ολοκλήρωση των πολλαπλών σταδίων του preprocessing, ακολουθεί η εξαγωγή των AIS clusters από το αρχικό dataset, που αντιστοιχούν σε clusters παλαιών τμημάτων τροχιών εμπορικών πλοίων, με βάση μια προκαθορισμένη διαδρομή και τοποθεσίες. Σύμφωνα πάντα με τους Kaklis et al. (2023), η διαδικασία ξεκινάει με την χρήση ενός «αραιού» θαλάσσιου πλέγματος, επάνω στο οποίο εφαρμόζεται ο αλγόριθμος αναζήτησης A* για να προκύψει μία πρόχειρη εκτίμηση της συντομότερης διαδρομής ανάμεσα στην εκκίνηση και τον προορισμό που έχει επιλεγεί. Ο A* ενσωματώνει μια συνάρτηση κόστους, που λαμβάνει υπόψη της παράγοντες όπως η απόσταση, η κατανάλωση καυσίμου και ο χρόνος. Το αρχικό αποτέλεσμα, όπως είναι φυσικό, είναι γεμάτο με απότομες αλλαγές κατεύθυνσης, σημεία αναφοράς που εντοπίζονται στην ξηρά και άλλες αστοχίες.

Σε αυτό το σημείο είναι που υπεισέρχεται η χρήση των AIS clusters με τα παλαιά τμήματα διαδρομών που αντιστοιχούν στο ταξίδι που έχει επιλεγεί. Κάθε cluster δεδομένων του AIS ορίζεται από το κυρτό κέλυφος ή, πιο απλά, πολύγωνο, των γεωγραφικών σημείων που βρίσκονται στα όριά του. Για να εξαχθεί το σύνολο των clusters που αντιστοιχούν στην επιθυμητή διαδρομή, λαμβάνεται το κεντρικό σημείο κάθε πολυγώνου και υπολογίζεται η απόσταση από κάθε σημείο αναφοράς που εξήχθη από τη συντομότερη διαδρομή που προέκυψε από τη χρήση του A*.

Επόμενο βήμα είναι η κατασκευή ενός τροποποιημένου πλέγματος, το οποίο όχι μόνο θα έχει μεγαλύτερη ανάλυση, αλλά και θα περιλαμβάνει νέα σημεία που περικλείονται από το πολύγωνο κάθε cluster, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν βάση για τη χρήση ενός αλγόριθμου εύρεσης βέλτιστης διαδρομής. Με τη χρήση των AIS clusters παλιών τροχιών μπορεί να δημιουργηθεί ένα προσαρμοσμένο πλέγμα το οποίο θα λαμβάνει υπόψη του στενά περάσματα, ζώνες πειρατείας και άλλα.



Εικόνα 7: Δείγμα του τροποποιημένου πλέγματος (Πηγή: Kaklis et al., 2023)

Μέσω των διεργασιών που προαναφέρθηκαν, είναι τώρα εφικτή η χρήση ενός αλγόριθμου βέλτιστης διαδρομής που λαμβάνει υπόψη την εμπειρία του παρελθόντος, περιορίζοντας το πεδίο αναζήτησης των εναλλακτικών διαδρομών. Πλέον, η εφαρμογή του A* είναι σε θέση να δώσει διαδρομές χωρίς τις αστοχίες που προέκυπταν με το αρχικό αραιό πλέγμα.

Για να εξαχθούν συμπεράσματα για την αποδοτικότητα της μεθοδολογίας σε ό,τι αφορά την επιθυμητή μείωση των διαδρομών και εξοικονόμηση οικονομικών πόρων, οι τελικές βελτιστοποιημένες διαδρομές που προέκυψαν από τη χρήση του αλγόριθμου τίθενται σε αντιπαραβολή με ένα ευρέως διαδεδομένο library ανοικτού κώδικα, το A to B via C, το οποίο χρησιμοποιεί ένα custom grid που έχει προκύψει από παρατηρήσεις επαγγελματιών του χώρου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ξεκάθαρα ότι το AIS routing που επιχειρεί το άρθρο, υπερτερεί σε ό,τι αφορά την επίτευξη συντομότερης διαδρομής ανάμεσα σε δύο λιμάνια.

Κεφάλαιο 4: Αποφυγή επικίνδυνων καιρικών φαινομένων

Η παρούσα εργασία, πέραν της βιβλιογραφικής επισκόπησης, στοχεύει στο να δώσει μια εικόνα των πιθανών προγραμματιστικών προσεγγίσεων που μπορεί να χρησιμοποιηθούν στην ανάπτυξη μιας εφαρμογής για εύρεση βέλτιστης διαδρομής λαμβάνοντας υπόψη καιρικές συνθήκες ή, αλλιώς, weather routing. Πρόκειται για ένα πρόβλημα που μπορεί να προσεγγιστεί με ποικίλους τρόπους και πολλαπλά τεχνολογικά stacks, ανάλογα με τον επιθυμητό βαθμό ακρίβειας.

Για την ενσωμάτωση μετεωρολογικών δεδομένων σε σχετικές εφαρμογές, υπάρχει η δυνατότητα αξιοποίησης API όπως το OpenWeatherMap (<https://openweathermap.org/>). Έπειτα από την απόκτηση ενός δωρεάν API key, οι προγραμματιστές μπορούν να προσδιορίσουν τα API endpoints που θα χρησιμοποιήσουν, με βάση τα δεδομένα που χρειάζονται (τρέχουσες καιρικές συνθήκες, προβλέψεις, κτλ). Οι κλήσεις API διεκπεραιώνονται μέσω HTTP request, με παραμέτρους σχετικά με την τοποθεσία και τις επιθυμητές μονάδες μέτρησης να διαβιβάζονται παράλληλα με το API key. Το API επιστρέφει δεδομένα σε μορφή JSON, τα οποία υπόκεινται σε parsing από την εφαρμογή και εμφανίζονται σε ευανάγνωστη μορφή στη διεπαφή χρήστη (UI).

Η ουσία του προβλήματος του weather routing μπορεί να συνοψιστεί σε δύο υποπροβλήματα: εύρεση βέλτιστης διαδρομής και αποφυγή εμποδίων. Από εκεί και πέρα, μπορούμε να έχουμε από μία πλήρως χειροκίνητη προσέγγιση για λόγους απεικόνισης, με στατικά δεδομένα που εισάγονται από τον χρήστη, μέχρι κινούμενα roaming geofences που αναπαριστούν τα καιρικά φαινόμενα που έχουν προκύψει ύστερα από σύνδεση με weather APIs και απαιτούν δυναμική αναπροσαρμογή πορείας των πλοίων, ανάλογα με τον βαθμό στατικότητας των φαινομένων.

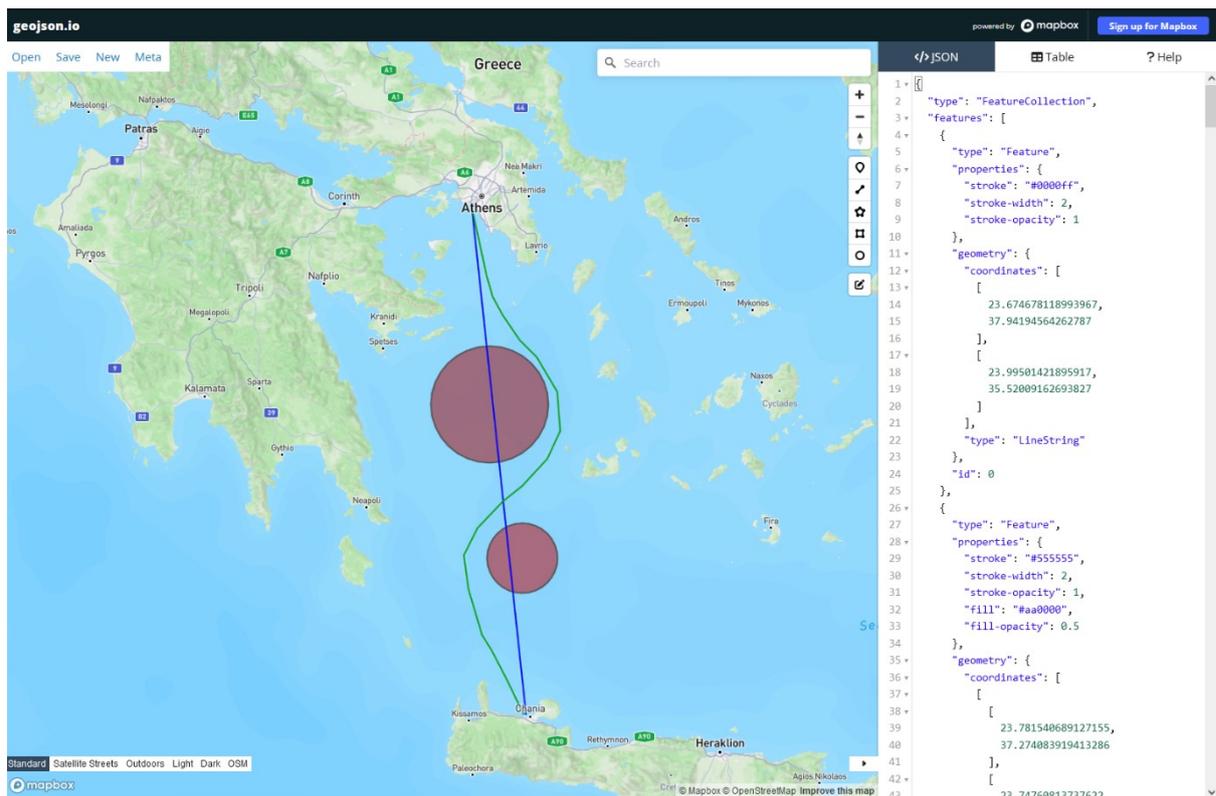
4.1. Χειροκίνητη χάραξη πορείας με το GeoJSON.io

Το GeoJSON.io είναι μια διαδικτυακή χαρτογραφική εφαρμογή, η οποία εστιάζει στην απεικόνιση γεωχωρικών διανυσματικών (vector) δεδομένων με χρήση του format δεδομένων GeoJSON. Πρόκειται για ένα ανοιχτό format που βασίζεται στο JavaScript Object Notation για να αναπαραστήσει γεωγραφικά δεδομένα. Η βασική μονάδα στο GeoJSON είναι η συντεταγμένη, ένας μοναδικός αριθμός που αντιπροσωπεύει μία γεωγραφική διάσταση: γεωγραφικό πλάτος, γεωγραφικό μήκος ή υψόμετρο. Η γεωγραφική θέση προκύπτει από ένα array συντεταγμένων, όμως στην περίπτωση του GeoJSON έχουμε αντιστροφή της κλασικής σειράς: προηγείται το γεωγραφικό μήκος και έπεται το γεωγραφικό πλάτος. Αυτό συμβαίνει ώστε να υπάρχει καλύτερη αντιστοιχία με τις καρτεσιανές συντεταγμένες, αφού ο οριζόντιος άξονας X απεικονίζει την μεταβολή του γεωγραφικού μήκους μέσω του άξονα Ανατολής-Δύσης και ο κατακόρυφος άξονας Y την μεταβολή του γεωγραφικού πλάτους μέσω του άξονα Βορρά-Νότου. Ένα ζεύγος συντεταγμένων μας δίνει ένα σημείο, δύο ζεύγη και πάνω δίνουν μία γραμμή και πολλαπλά ζεύγη συντεταγμένων που δημιουργούν ένα κλειστό σχήμα θεωρούνται πολύγωνα.

Ο χρήστης του GeoJSON.io έχει τη δυνατότητα να φορτώσει δεδομένα διαφόρων μορφών (KML, CSV, Shapefiles) και να απεικονίσει στον χάρτη σημεία, γραμμές, πολύγωνα, τετράγωνα και κύκλους, τα οποία αυτομάτως αποκτούν συντεταγμένες και θεωρούνται γεωαναφερμένα γεωχωρικά χαρακτηριστικά. Στη δεξιά πλευρά της οθόνης εμφανίζεται ο κώδικας GeoJSON των σχημάτων που έχουν εμφανιστεί στον χάρτη, με αποτέλεσμα να μπορεί να πραγματοποιηθεί εύκολη εισαγωγή των σχημάτων αυτών σε μια πιθανή εφαρμογή που αναπτύσσει ο χρήστης εκείνη τη στιγμή.

Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι πρόκειται για μία ελαφριά και περιορισμένη υλοποίηση Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS), η οποία φυσικά δε διαθέτει το εύρος χαρακτηριστικών και δυνατοτήτων μιας τέτοιας σουίτας εφαρμογών, όμως δίνει το περιθώριο ανάπτυξης απλών χαρτογραφικών υλοποιήσεων και αποτελεί άριστο εργαλείο οπτικοποίησης χαρτογραφικών δεδομένων, είτε ύστερα από εισαγωγή τους, είτε ύστερα από δημιουργία τους. Επιπλέον, επιτρέπει το εύκολο prototyping χωρικών υλοποιήσεων.

Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας, το GeoJSON.io χρησιμοποιήθηκε για οπτικοποίηση του concept του weather routing. Δημιουργήθηκε μία αρχική γραμμή που αντιπροσωπεύει τη διαδρομή από Πειραιά προς Χανιά χωρίς εμπόδια. Κατόπιν, τοποθετήθηκαν δύο κύκλοι που αντιπροσωπεύουν δυσμενή καιρικά φαινόμενα και τέλος χαράχτηκε, χειροκίνητα, μία γραμμή που θα μπορούσε να αντιπροσωπεύει την συντομότερη διαδρομή ανάμεσα στα δύο λιμάνια, όπως αυτή προκύπτει λόγω της ανάγκης αποφυγής των καιρικών φαινομένων.



Εικόνα 8: Χειροκίνητη χάραξη τροχιών ανάμεσα από εμπόδια στο GeoJSON.io

Δεδομένου ότι, όπως προαναφέρθηκε, κάθε σχήμα στον χάρτη είναι γεωαναφερμένο, δεν μπορεί να αποκλειστεί η χρήση του GeoJSON.io για χειροκίνητη χάραξη πορείας, που θα μπορούσε μετά να εισαχθεί σε μια εφαρμογή πλοήγησης. Αυτό προφανώς δε μπορεί να συμβεί σε μία μεγάλη ναυτιλιακή εταιρεία, όμως μπορεί, για παράδειγμα, να φανεί χρήσιμο για τον σχεδιασμό μιας διαδρομής ιστιοπλοΐας σε ερασιτεχνικό επίπεδο.

4.2. Αποφυγή εμποδίων με χρήση Turf.js

Το Turf.js είναι μία Javascript library ανοικτού κώδικα, η οποία προσφέρει τη δυνατότητα υλοποίησης ενεργειών γεωχωρικής ανάλυσης, χωρίς την ανάγκη χρήσης βάσης δεδομένων. Στην πράξη πρόκειται για ένα σύνολο από modular functions που επιτρέπουν την διαχείριση δεδομένων μορφής GeoJSON.

Όπως καθίσταται σαφές από μία ανάγνωση του documentation του Turf.js στο <https://turfjs.org>, οι συμπεριληφθείσες λειτουργίες είναι ιδιαίτερα εκτεταμένες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ποικίλες εφαρμογές γεωχωρικής ανάλυσης με χρήση JavaScript. Το Turf.js λειτουργεί τμηματικά, υπό την έννοια ότι για να γίνει εκμετάλλευση των διατιθέμενων function θα πρέπει να γίνει εισαγωγή τους στον κώδικα ξεχωριστά μέσω της εντολής npm install, ώστε να μην επιβαρύνεται το πρόγραμμα με αχρησιμοποίητα functions. Οι λειτουργίες των functions εντάσσονται σε ευρύτερες κατηγορίες λειτουργιών γεωχωρικής ανάλυσης: μέτρηση, μετασχηματισμός συντεταγμένων, μετατροπές σχημάτων, μετατροπές χαρακτηριστικών, παρεμβολή, ομαδοποίηση και άλλα.

Για τις ανάγκες της εργασίας υλοποιήθηκε μια ενδεικτική εφαρμογή σε Node.js runtime environment και Express.js framework, η οποία κάνει χρήση των δυνατοτήτων του Turf.js για χάραξη μονοπατιού βέλτιστης διαδρομής που λαμβάνει υπόψη του την παρουσία εμποδίων. Για την χαρτογραφική απεικόνιση χρησιμοποιήθηκε η JavaScript library ανοικτού κώδικα Leaflet.js και εισήχθησαν πολλαπλά functions από το Turf.js. Δημιουργήθηκε μια δομή αρχείων κατάλληλη για εφαρμογή Node.js, με ένα κεντρικό αρχείο index.html που περιείχε το div του χάρτη, ένα αρχείο server.js για τον web server κι ένα αρχείο app.js με τον κώδικα της εφαρμογής.

Ως είθισται στις χαρτογραφικές εφαρμογές που κάνουν χρήση του Leaflet.js, έγινε initialization του χάρτη και προσθήκη του default tile layer από το Open Street Maps και επάνω στον χάρτη τοποθετήθηκαν πινέζες στα λιμάνια Πειραιά και Χανίων μέσω του L.marker() function του Leaflet. Κατόπιν, επειδή θα ακολουθούσε επεξεργασία με το Turf.js, το οποίο, όπως

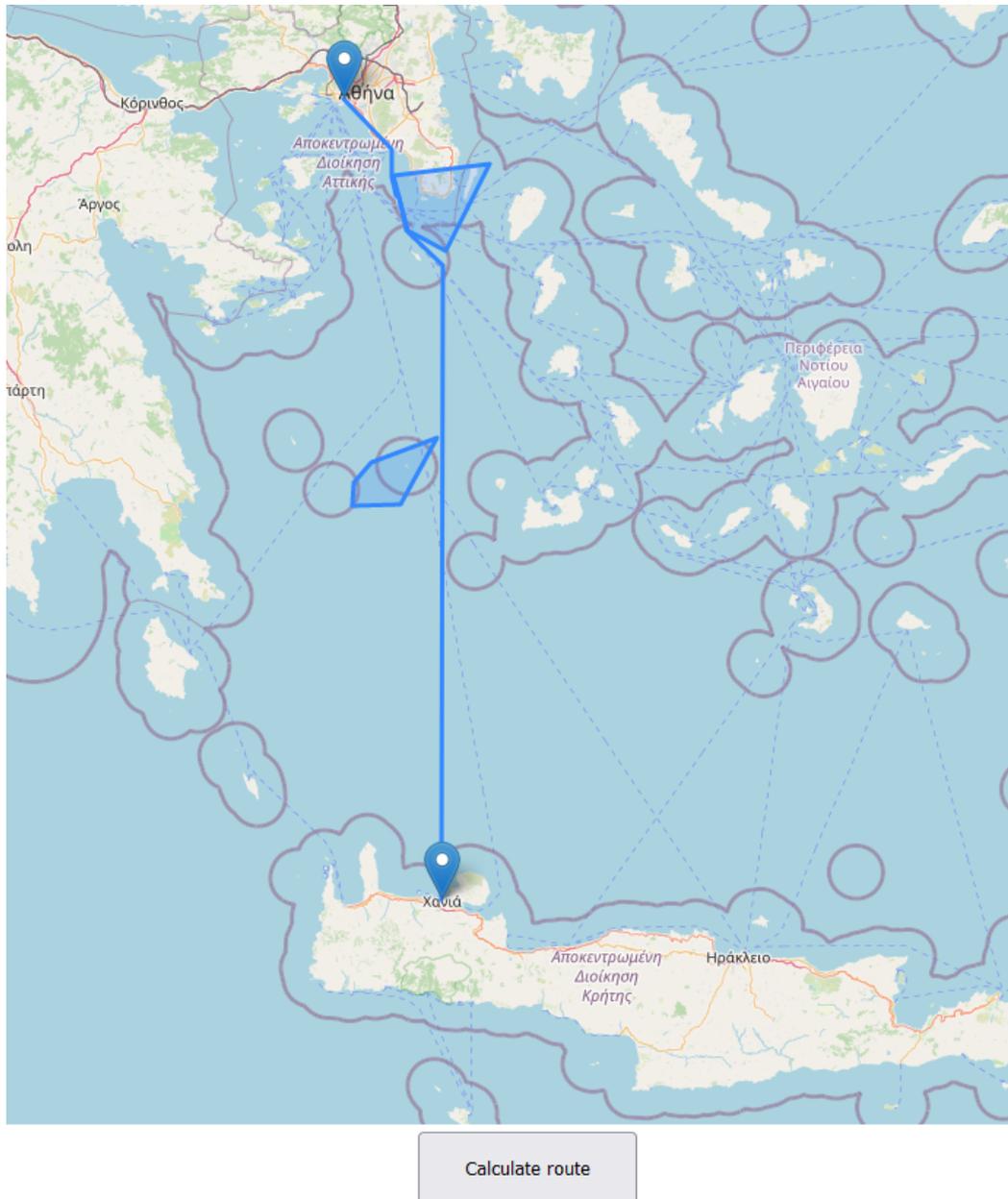
προαναφέρθηκε, διαχειρίζεται τα γεωγραφικά δεδομένα σε μορφή GeoJSON, έγινε αντιστροφή των συντεταγμένων ώστε το γεωγραφικό μήκος να προηγείται του γεωγραφικού πλάτους.

```
1 // Initialize Leaflet map and add tile layer
2 const map = L.map('map').setView([35.5154787, 24.9345812], 7);
3
4 L.tileLayer('https://{s}.tile.openstreetmap.org/{z}/{x}/{y}.png', {
5   attribution: 'Map data &copy; <a href="https://www.openstreetmap.org/">OpenStreetMap</a> contributors',
6 }).addTo(map);
7
8 // Add Piraeus and Chania port marker
9 const piraeusMarker = L.marker([37.9475, 23.6461]).addTo(map);
10 piraeusMarker.bindPopup('Piraeus Port');
11 const chaniaMarker = L.marker([35.5138, 24.0180]).addTo(map);
12 chaniaMarker.bindPopup('Chania Port');
13
14 // Convert coordinates to [lon, lat] format for turf
15 const piraeusCoords = [piraeusMarker.getLatLng().lng, piraeusMarker.getLatLng().lat];
16 const chaniaCoords = [chaniaMarker.getLatLng().lng, chaniaMarker.getLatLng().lat];
17
18 // Define polygons and add them to the map
19 const polygon1 = turf.polygon([[24.000555, 36.927236], [23.754669, 36.853194], [23.688224, 36.791565], [23.683568, 36.720368], [23.862179, 36.726024], [24.000555, 36.927236]]);
20 const polygon2 = turf.polygon([[23.833778, 37.717668], [24.196405, 37.754525], [24.034692, 37.492018], [23.889386, 37.551704], [23.833778, 37.717668]]);
21
22 L.geoJSON([polygon1, polygon2]).addTo(map);
23
24 // Shortest path using turf.js
25 const start = piraeusCoords;
26 const end = chaniaCoords;
27 const options = {
28   obstacles: polygon1,
29   obstacles: polygon2
30 };
31
32 // Click to find the shortest path
33 document.getElementById("routeButton").addEventListener("click", function() {
34   const path = turf.shortestPath(start, end, options);
35   L.geoJSON(path).addTo(map);
36 });
```

Εικόνα 9: Εύρεση βέλτιστου μονοπατιού με GeoJSON και Turf.js

Σειρά είχε ο καθορισμός δύο πολυγώνων μέσω του function `turf.polygon()`, τα οποία αντιπροσωπεύουν δυσμενή καιρικά φαινόμενα, και η εμφάνισή τους στον χάρτη μέσω του function `L.geoJSON().addTo(map)`. Στο τελευταίο και πιο σημαντικό τμήμα της εφαρμογής γίνεται χρήση της συνάρτησης `turf.shortestPath(start, end, options)`, η οποία εφαρμόζει μία απλή υλοποίηση του αλγόριθμου αναζήτησης A^* για να βρει την μικρότερη απόσταση ανάμεσα στα δύο λιμάνια, λαμβάνοντας υπόψη τα πολύγωνα-εμπόδια. Τη στιγμή της συγγραφής της εργασίας υπήρχαν ενδεχομένως κάποια bugs στην υλοποίηση του function, αφού η προσθήκη των παραμέτρων της ελάχιστης απόστασης από το εμπόδιο και της ανάλυσης του grid της A^* δεν επέτρεπαν την εμφάνιση της διαδρομής, ενώ υπήρχαν και μηνύματα λάθους για “invalid obstacles” μετά την προσθήκη και δεύτερου πολυγώνου. Παρ’ όλα αυτά, είναι ξεκάθαρο από το τελικό αποτέλεσμα ότι η `turf.shortestPath` λειτουργεί σε πρώιμο έστω επίπεδο και με τις

κατάλληλες βελτιώσεις θα είναι σε θέση να παρέχει ικανοποιητική χάραξη συντομότερης διαδρομής με τη χρήση μιας μόνο συνάρτησης. Η χάραξη αυτή καθαυτή της διαδρομής πραγματοποιείται μέσω ενός click event που ενεργοποιεί το `turf.shortestPath`.



Εικόνα 10: Αποφυγή πολυγώνων-εμποδίων με `turf.shortestPath()`

Οι προαναφερθείσες λειτουργίες θα μπορούσαν να επεκταθούν με την προσθήκη click events για τη δημιουργία των πολυγώνων και τον συνακόλουθο επανασχεδιασμό της βέλτιστης διαδρομής με κάθε προσθήκη νέου πολυγώνου. Παράλληλα, για να μπορεί να σταθεί μια

εφαρμογή τέτοιου είδους σε επίπεδο production, επιβάλλεται η χρήση γεωχωρικής βάσης δεδομένων, όπως η PostgreSQL με την επέκταση PostGIS, ώστε να μπορεί να προκύψει εκμετάλλευση δεδομένων από ιστορικές διαδρομές, διαχείριση μεγάλου όγκου καιρικών δεδομένων μετά από σύνδεση με weather API, μοντελοποίηση εδάφους και βυθού και πολλές άλλες δυνατότητες που θα προσέδιδαν τα επιθυμητά επίπεδα λεπτομέρειας και ακρίβειας στην υλοποίηση. Για ροή δεδομένων καιρού σε πραγματικό χρόνο, ενδείκνυται η χρήση του πρωτοκόλλου επικοινωνίας WebSocket, που ξεπερνά σε αποτελεσματικότητα το απλό HTTP polling, λόγω της αμφίδρομης επικοινωνίας μέσω σταθερής TCP σύνδεσης.

4.3. Διαχείριση δεδομένων καιρού σε πραγματικό χρόνο μέσω roaming geofences

Η παρακολούθηση του καιρού σε πραγματικό χρόνο και η ανανέωση μιας θαλάσσιας διαδρομής ανάλογα με τα δεδομένα που προκύπτουν είναι πλέον εφικτά, όμως πάντα υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης και εναλλακτικών προσεγγίσεων.

Η αναπαράσταση των καιρικών φαινομένων γίνεται συνήθως μέσω πλέγματος (grid) τύπου raster, όπου σε κάθε pixel του πλέγματος αντιστοιχίζονται κλιματικές παράμετροι, όπως η θερμοκρασία, η βροχόπτωση, η ένταση του ανέμου, η ατμοσφαιρική πίεση και άλλα. Αντίστοιχα, χρησιμοποιούνται διανυσματικά δεδομένα (vector) για να υποδείξουν την πορεία ενός τυφώνα ή για να καθορίσουν τα όρια μιας καταιγίδας.

Στο πλαίσιο λοιπόν της αναζήτησης τρόπων αναπαράστασης των καιρικών φαινομένων, προτείνεται η χρήση των roaming geofences. Το geofence (γεωγραφικός «φράκτης»), είναι ένα εικονικό όριο ή ζώνη που περιβάλλει ένα γεωγραφικό σημείο στον χάρτη. Το βασικό του χαρακτηριστικό είναι ότι είναι σε θέση να αναγνωρίσει την είσοδο, έξοδο ή παραμονή φυσικών οντοτήτων επί των ορίων του και να ενημερώσει αναλόγως τους ενδιαφερόμενους. Μερικά συνηθισμένα σενάρια χρήσης των geofences είναι η ειδοποίηση σε έναν χρήστη ότι τον πλησιάζει το όχημα που έχει καλέσει και η παρακολούθηση οχημάτων εφοδιαστικής αλυσίδας

και ενημέρωση της εταιρείας για την άφιξή τους σε προδιαγεγραμμένα σημεία (πχ, παράδοσης προϊόντων ή ανεφοδιασμού). Εκτός των άλλων, έχει αναφερθεί και η χρήση τους για την ενημέρωση πολιτών όταν μια καταιγίδα πλησιάζει σε ένα geofence που περιβάλλει κάποια κατοικημένη περιοχή.

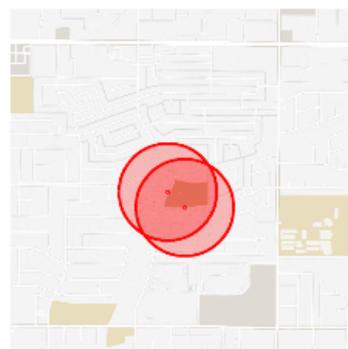
Roaming Geofences

EDIT

Tile38 1.2 introduces a powerful new feature which allows for dynamic [geofences](#). This enables realtime monitoring for when one or more moving objects are nearby each other.

A couple of common use cases are:

- **Vehicle pickup services:** Instantly be notified when a vehicle is nearby somebody waiting to be picked up, or when a person approaches a vehicle, or when a vehicle is nearby other vehicles in the fleet.
- **Proximity social apps:** Very useful for when you need to check if two users are nearby each other without having to constantly query the database.



A simple example:

```
NEARBY people FENCE ROAM people * 5000
```

This will open a roaming fence on the `people` collection. The fence watches for when any object is within 5000 meters of any other object in the same collection.

Εικόνα 11: Τα βασικά χαρακτηριστικά των *roaming geofences* (Πηγή: <https://tile38.com/topics/roaming-geofences>)

Αντιθέτως, η χρήση τους για την αναπαράσταση επικίνδυνων και ταχέως κινούμενων καιρικών φαινομένων δεν είναι διαδεδομένη, κάτι, που, θεωρητικά, θα μπορούσε να καταστεί εφικτό μέσω των *roaming* (περιπλανώμενων) *geofences* που παρέχει το Tile38. Πρόκειται για μία γεωχωρική βάση δεδομένων και ταυτόχρονα *geofence server*, που έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να εκτελεί διεργασίες *geofencing* όσο ταχύτερα γίνεται. Τα *roaming geofences* είναι δυναμικά *geofences* που επιτρέπουν παρακολούθηση δύο κινούμενων αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο, ώστε να υπάρξει ενημέρωση όταν πλησιάζουν μεταξύ τους.

Είναι εύλογο λοιπόν να υποθέσει κανείς, αν όντως δεν έχει εφαρμοστεί ήδη κάτι παρόμοιο, ότι η συγκεκριμένη λειτουργικότητα θα μπορούσε να υλοποιηθεί στο πλαίσιο του weather routing. Το ένα κινούμενο geofence θα μπορούσε να είναι το πλοίο και το δεύτερο η καταιγίδα. Αν πλησιάσουν μεταξύ τους σε απόσταση μικρότερη της επιθυμητής, το πλοίο θα ενημερώνεται, ενώ, δεδομένου ότι το roaming geofence πραγματοποιεί tracking σε πραγματικό χρόνο, θα ήταν εφικτό να γίνει υπολογισμός της πορείας της καταιγίδας και συνακόλουθη χάραξη νέας βέλτιστης πορείας για το πλοίο.

Συμπεράσματα

Σε αντίθεση με τη μακρινή εποχή του Matthew Maury, η ναυσιπλοΐα βασίζεται σε πολύ περισσότερα από ένα εγχειρίδιο για να πετύχει τον στόχο της βέλτιστης διαδρομής μετά από αποφυγή δυσμενών καιρικών συνθηκών. Εξήντα περίπου χρόνια μετά το μήνυμα στον ασύρματο που έσωσε το U.S.S. Kirkpatrick από τον τυφώνα Hannah, η ακαδημαϊκή κοινότητα συνεχίζει να πραγματοποιεί εκτεταμένη έρευνα στον τομέα και συνεισφέρει αδιάλειπτα στη βελτίωση της απόδοσης των αλγοριθμικών προσεγγίσεων. Πλέον υπάρχει πρόσβαση σε σχετικά εργαλεία όχι μόνο στους προγραμματιστές, αλλά και στο ευρύ κοινό, ενώ αυξάνεται η ποιότητα και ο αριθμός των διαθέσιμων λύσεων. Η διττή όμως φύση του προβλήματος της εύρεσης βέλτιστης διαδρομής με ταυτόχρονη αποφυγή επικίνδυνων καιρικών φαινομένων σημαίνει ότι πάντα θα υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης των υπάρχοντων τεχνικών ή και εξεύρεσης νέων.

Καθίσταται ξεκάθαρο από την μελέτη του ζητήματος, ότι πρωταρχικό ρόλο στην επίλυσή του διαδραματίζει η συνεχής προσπάθεια βελτιστοποίησης των κλασικών αλγορίθμων εύρεσης μονοπατιών, διότι και η επαναδρομολόγηση θα πρέπει να καλύπτει τις προϋποθέσεις της βέλτιστης δρομολόγησης. Η διαφορά εδώ είναι ότι μπορεί να έχουμε πολλές εκ νέου δρομολογήσεις, ενώ η χωρική τοποθέτηση των εμποδίων που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη, μπορεί να δυσκολέψει σε μεγάλο βαθμό τους απαραίτητους υπολογισμούς.

Ο παράγοντας του εμποδίου που αντιπροσωπεύει το εκάστοτε υπό εξέταση καιρικό φαινόμενο δείχνει να έχει μελετηθεί λιγότερο, όχι τόσο σε επίπεδο κλιματολογίας και πρόβλεψης, όσο σε επίπεδο αναπαράστασης και αλληλεπίδρασης με το βέλτιστο μονοπάτι, λόγω ίσως της ευμετάβλητης φύσης του. Μία καταιγίδα, για παράδειγμα, δεν έχει ιδιαίτερα καθορισμένη μορφή, ενώ υπάρχει πιθανότητα να κινηθεί γρήγορα και απρόβλεπτα. Ιδιαίτερα βοηθητικά για την αντιμετώπιση αυτών των καταστάσεων αποδεικνύονται εν τέλει τα διαθέσιμα γεωχωρικά εργαλεία, τα οποία όσο περνάει ο καιρός διευκολύνουν την ενσωμάτωση των υπό επεξεργασία δεδομένων σε υπάρχουσες εφαρμογές, ενώ παράλληλα εκσυγχρονίζονται ώστε να παρέχουν προηγμένες λειτουργίες επεξεργασίας δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και, κατ' επέκταση, άμεση δυνατότητα αντίδρασης σε επικίνδυνες καιρικές συνθήκες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

LCDR. A. T. Buckmaster USN , LCDR. H. W. Albers USN , E. M. Ballenzweig & J. F. Miller (1960) *Weather Routing of Ships by the U. S. Navy*, *Weatherwise*, 13:3, 94-98. <https://doi.org/10.1080/00431672.1960.9925080>

Zis, T. P. V., Psaraftis, H. N., & Ding, L. (2020). *Ship weather routing: A taxonomy and survey*. *Ocean Engineering*, 213, Article 107697. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107697>

Hanssen, G. L., & James, R. W. (1960). *Optimum ship routing*. *The Journal of Navigation*, 13(3), 253-272. <https://doi.org/10.1017/S0373463300033580>

Hagiwara, H. (1989). *Weather routing of (sail-assisted) motor vessels*. PhD Thesis, Technical University of Delft.

Lin, Yu-Hsien, Ming-Chung Fang, and Ronald W. Yeung. "The optimization of ship weather-routing algorithm based on the composite influence of multi-dynamic elements." *Applied Ocean Research* 43 (2013): 184-194. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2013.07.010>

Bellman, R. (1952). *On the theory of dynamic programming*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 38(8), 716-719. <https://doi.org/10.1073/pnas.38.8.716>

Zoppoli, R. (1972). *Minimum-time routing as an N-stage decision process*. *Journal of applied Meteorology*, 11(3), 429-435. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1972\)011<0429:MTRAAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1972)011<0429:MTRAAS>2.0.CO;2)

Chen, H. (1978). *A dynamic program for minimum cost ship routing under uncertainty* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).

Wang, C. T. (1993). *Sailing ship routing and dynamic programming*. RAIRO Recherche Operationelle, 27(1):61 – 76

Shao, W., & Zhou, P. (2011). *Development of a dynamic programming method for low fuel consumption and low carbon emission from shipping*. In International Conference on Technologies, Operation and Logistics and Modelling for Low Carbon Shipping 2011.

Haltiner, G. J., H. D. Hamilton, and G. 'Arnason. "Minimal-time ship routing." *Journal of Applied Meteorology* 1.1 (1962): 1-7.

Perakis, A. N., & Papadakis, N. A. (1989). *Minimal time vessel routing in a time-dependent environment*. *Transportation Science*, 23(4), 266-276. <https://doi.org/10.1287/trsc.23.4.266>

Papadakis, N. A., & Perakis, A. N. (1990). *Deterministic minimal time vessel routing*. *Operations Research*, 38(3), 426-438. <https://doi.org/10.1287/opre.38.3.426>

Padhy, C. P., Sen, D., & Bhaskaran, P. K. (2008). *Application of wave model for weather routing of ships in the North Indian Ocean*. *Natural Hazards*, 44(3), 373-385. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9126-1>

Szlapczynska, J. (2015). *Multi-objective weather routing with customised criteria and constraints*. *The Journal of Navigation*, 68(2), 338-354. <https://doi.org/10.1017/S0373463314000691>

Mannarini, G., Coppini, G., Oddo, P., & Pinardi, N. (2013). *A prototype of ship routing decision support system for an operational oceanographic service*. *TransNav, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 7(1). <https://doi.org/10.12716/1001.07.01.06>

Simonsen, M. H., Larsson, E., Mao, W., & Ringsberg, J. W. (2015). *State-of-the-art within ship weather routing*. In ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. <https://doi.org/10.1115/OMAE2015-41939>

Roh, M. I. (2013). *Determination of an economical shipping route considering the effects of sea state for lower fuel consumption*. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 5(2), 246-262. <https://doi.org/10.3744/JNAOE.2013.5.2.246>

Wang, K., Yan, X., Yuan, Y., & Li, F. (2016). *Real-time optimization of ship energy efficiency based on the prediction technology of working condition*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 46, 81-93. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.03.014>

Mao, W., Rychlik, I., Wallin, J., & Storhaug, G. (2016). *Statistical models for the speed prediction of a container ship*. Ocean engineering, 126, 152-162. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.08.033>

Gkerekos, C., & Lazakis, I. (2020). *A novel, data-driven heuristic framework for vessel weather routing*. Ocean Engineering, 197, 106887. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106887>

Ioannis Kontopoulos, Iraklis Varlamis & Konstantinos Tserpes (2021). *A distributed framework for extracting maritime traffic patterns*, International Journal of Geographical Information Science, 35:4, 767-792. <https://doi.org/10.1080/13658816.2020.1792914>

Kaklis D, Kontopoulos I, Varlamis I, Emiris IZ, Varelas T. *Trajectory Mining and Routing: A Cross-Sectoral Approach*. Journal of Marine Science and Engineering. 2024; 12(1):157. <https://doi.org/10.3390/jmse12010157>

Turf.js. (n.d.). *Turf.js documentation*. [Online]. Retrieved from: <https://turfjs.org/>

Tile38 (n.d.) *Tile38 documentation*. [Online]. Retrieved from: <https://tile38.com/>