



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ: “ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΑ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ”

Αλγόριθμος δρομολόγησης πλοίων διεργασιών υπεράκτιου
αιολικού πάρκου για τη διαχείριση καυσίμων

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία
Επιβλέπων Καθηγητής: Δημοσθένης Κυριαζής

Ιωάννα Κανδή

ME2136

ioannakandi@gmail.com

Πειραιάς, Ιανουάριος 2023

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς τον καθηγητή Δημοσθένη Κυριαζή για την καθοδήγηση που μου προσέφερε κατά την περίοδο της εκπόνησης της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου και στον αδερφό μου για την αδιάκοπη πίστη τους στις ικανότητες και τις δυνατότητές μου. Τέλος, ευχαριστώ θερμά τον άνθρωπό μου για όλες τις φορές που με καθυσύχαζε και με ηρεμούσε και που συνεχίζει να με στηρίζει.

Ιωάννα Κανδή

Στην οικογένειά μου

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες	1
Πίνακας Ακρωνυμίων	5
Κατάλογος Πινάκων	6
Κατάλογος Εικόνων.....	6
Περίληψη	8
1. Εισαγωγή	9
1.1 Σκοπός της εργασίας.....	9
1.2 Δομή της εργασίας.....	10
2. Συστήματα Δυναμικής Τοποθέτησης (Dynamic Positioning).....	11
2.1 Ορισμός και Ιστορική Αναδρομή	11
2.2 Το σύστημα	15
2.2.1 Σύστημα Ελέγχου (DP Control System)	15
2.2.2 Σύστημα Προωθητήρων (Thruster System)	15
2.2.3 Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (Power Management System / PMS).....	15
2.3 Λειτουργία.....	16
2.4 Χρησιμότητα.....	19
2.5 Kalman Filtering.....	20
3. Μηχανική Μάθηση (Machine Learning)	22
4. Διαχείριση Κατανάλωσης Καυσίμων & Ανάλυση Δεδομένων.....	24
4.1 Μοντέλα Πρόβλεψης Κατανάλωσης καυσίμων	24
4.2 Ανάλυση Δεδομένων για την Κατανάλωση Καυσίμων.....	26
5. Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα (Offshore Wind Farms).....	28
6. Προτεινόμενη Προσέγγιση	32
6.1. Συλλογή Δεδομένων.....	32
6.2. Προεπεξεργασία Δεδομένων	35
6.2.1. MongoDB	35
6.2.2. Python	44
6.3. Επιλογή Χαρακτηριστικών (Feature Selection).....	48
6.4. Προτεινόμενος Αλγόριθμος	58
6.5. Διεπαφή Χρήστη	63

7. Οδηγίες Εγκατάστασης.....	66
8. Συμπεράσματα	67
Αναφορές.....	69

Πίνακας Ακρωνυμίων

Ακρωνύμιο	Ορισμός
EE	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΗΠΑ	Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής
AUV	Autonomous Underwater Vehicles/ Αυτόνομα Υποβρύχια Οχήματα
BBM	Black Box Model
DP	Dynamic Positioning / Δυναμική Τοποθέτηση
DPS	Dynamic Positioning System / Σύστημα Δυναμικής Τοποθέτησης
EKF	Extended Kalman Filter
GBM	Gray Box Model
GW	Gigawatt / Γιγαβάτ
LSTM	Long- Short Term Memory
ML	Machine Learning / Μηχανική Μάθηση
MLR	Multiple Linear Regression / Πολλαπλή Γραμμική Παλινδρόμηση
MS	Milliseconds
MW	Megawatt / Μεγαβάτ
OWF	Offshore Wind Farm / Υπεράκτιο Αιολικό Πάρκο
PMS	Power Management System / Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας
PRS	Positions Reference Systems / Συστήματα Αναφοράς Θέσης
ROV	Remotely Operated Vehicle / Τηλεχειριζόμενο Όχημα
SULOV	Searching for Uncorrelated List Of Variables / Αναζήτηση για τις μη συσχετιζόμενες μεταβλητές (σε ένα σύνολο δεδομένων)
UKF	Unscented Kalman Filter
WBM	White Box Model
WGS	World Geodetic System

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Βασικές Λειτουργίες Ενός DP Συστήματος.....	18
Πίνακας 2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης Dynamic Positioning	19
Πίνακας 3: Επεξήγηση Τιμών Συσχέτισης Pearson	23
Πίνακας 4: Σύγκριση MLR και LSTM	27
Πίνακας 5: Συνδεδεμένα υπεράκτια αιολικά πάρκα στην Ευρώπη μέχρι τον Ιούνιο 2022	29
Πίνακας 6: Μεταβλητές Δεδομένων Πλοίων	33
Πίνακας 7: Μεταβλητές Δεδομένων Καιρού	34
Πίνακας 8: Χρόνοι Εκτέλεσης Αναζήτησης Με/Χωρίς την Χρήση index	38
Πίνακας 9: Συντεταγμένες Ανεμογεννητριών	40
Πίνακας 10: Μεταβλητές τελικού αρχείου (completeDatasetMerged).....	46

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Eureka, 1961. Το πρώτο πλοίο με τεχνολογία Dynamic Positioning.....	11
Εικόνα 2: Κινήσεις ενός πρώιμου συστήματος Dynamic Positioning	13
Εικόνα 3: Υποσυστήματα Dynamic Positioning	16
Εικόνα 4: Τρόπος λειτουργίας ενός Dynamic Positioning συστήματος	16
Εικόνα 5: Διαδικασία Kalman Filtering	21
Εικόνα 6: Τύπος και Τεχνικές Μηχανικής Μάθησης	23
Εικόνα 7: Μοντέλα Πρόβλεψης Κατανάλωσης Καυσίμων.....	24
Εικόνα 8: Σύγκριση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων Vindeby (1991) & Hornsea 2 (2022)	30
Εικόνα 9: Παράδειγμα ενός document της συλλογής 'Vessels'	35
Εικόνα 10: Απεικόνιση Συντεταγμένων Πλοίων της Συλλογής 'Vessels' (Σαρωνικός)	36
Εικόνα 11: Απεικόνιση Συντεταγμένων Πλοίων της Συλλογής 'Vessels' (Ευρύτερο Λιμάνι Πειραιά)	36
Εικόνα 12: Απεικόνιση Συντεταγμένων Λήψης Δεδομένων Καιρού της Συλλογής 'Weather' ...	37
Εικόνα 13: Θέσεις ανεμογεννητριών αιολικού πάρκου	38
Εικόνα 14: Θέσεις ανεμογεννητριών αιολικού πάρκου σε μεγέθυνση	39
Εικόνα 15: Aggregation Pipeline εύρεσης πλοίων	41
Εικόνα 16: Aggregation Pipeline απομόνωσης επιλεχθέντων πλοίων (20 πλοία).....	41
Εικόνα 17: Διαδικασία επιλογής ανεμογεννητριών	42
Εικόνα 18: Διαδικασία επιλογής πλοίων.....	43
Εικόνα 19: Κώδικας επεξεργασίας ημερομηνίας (timestamp_)	45
Εικόνα 20: Διαδικασία επεξεργασίας τελικού αρχείου δεδομένων (completeDatasetMerged)	47
Εικόνα 21: Γενικές πληροφορίες συνόλου δεδομένων.....	49
Εικόνα 22: Διάγραμμα συσχέτισης Spearman	50
Εικόνα 23: Διάγραμμα συσχέτισης Pearson.....	51
Εικόνα 24: Διάγραμμα SULO - επιλογή χαρακτηριστικών	54
Εικόνα 25: Επαναλήψεις Recursive XGBoost - επιλογή χαρακτηριστικών	56

Εικόνα 26: Διαδικασία επιλογής χαρακτηριστικών (featurewiz).....	57
Εικόνα 27: Σχηματική αναπαράσταση του αιολικού πάρκου	59
Εικόνα 28: Απεικόνιση δρομολόγησης πλοίων χωρίς συντήρηση ανεμογεννήτριας (regular routing).	61
Εικόνα 29: Απεικόνιση δρομολόγησης πλοίων με συντήρηση ανεμογεννήτριας (turbine maintenance).....	62
Εικόνα 30: Διεπαφή χρήστη της πλατφόρμας δρομολόγησης 'Wind Wise' (αναζήτηση δρομολογίων).	63
Εικόνα 31: Διεπαφή χρήστη της πλατφόρμας δρομολόγησης 'Wind Wise' (επιλογή ανεμογεννήτριας για συντήρηση).	64
Εικόνα 32: Διεπαφή χρήστη της πλατφόρμας δρομολόγησης 'Wind Wise' (εμφάνιση δρομολογίων).	64
Εικόνα 33: Διεπαφή χρήστη της πλατφόρμας δρομολόγησης 'Wind Wise' (πληροφορίες & φόρμα επικοινωνίας).....	65
Εικόνα 34 : Αποθετήριο (repository) GitHub "master_thesis"	66

Περίληψη

Η σύγχρονη εποχή χαρακτηρίζεται από την εκθετική αύξηση στην παραγωγή δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά απαντώνται σε όλους τους τομείς -επαγγελματικούς και ερευνητικούς- της καθημερινότητας. Πιο συγκεκριμένα η παραγωγή, η συλλογή και η επεξεργασία των δεδομένων χρήζει έντονου ενδιαφέροντος -μεταξύ άλλων- στους κλάδους της ναυτιλίας και της ναυσιπλοΐας. Τεχνικά δεδομένα του πλοίου, καθώς και δεδομένα καιρού και θέσης, παράγονται και συλλέγονται από ειδικούς αισθητήρες πάνω στα πλοία, τα οποία με την κατάλληλη επεξεργασία χρησιμοποιούνται για την διατήρηση της θέσης και της πορείας των σκαφών, αλλά και για τη δρομολόγησή τους. Η δρομολόγηση των πλοίων είναι ζήτημα καίριας σημασίας όταν γίνεται λόγος για πλοία που κινούνται εντός ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Αυτό συμβαίνει διότι, σε ένα τέτοιο περιβάλλον, η δρομολόγηση και η πλεύση τους επηρεάζεται από πολυάριθμες συνθήκες, μια από τις οποίες είναι και η κατανάλωση καυσίμων. Για λόγους αποφυγής περαιτέρω δαπανών, καθίσταται απαραίτητη η δρομολόγηση πλοίων σε ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο, λαμβάνοντας υπόψη την αποτελεσματική κατανάλωση καυσίμων. Προς αυτή την κατεύθυνση, η παρούσα διπλωματική εργασία προτείνει έναν αλγόριθμο δρομολόγησης πλοίων διεργασιών θαλάσσιου αιολικού πάρκου για τη διαχείριση καυσίμων. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος στηρίζεται στη μοντελοποίηση ενός θαλάσσιου αιολικού πάρκου ως συνδεδεμένο γράφο, όπου οι κόμβοι αντιστοιχούν στις ανεμογεννήτριες και οι ακμές στο κόστος μετακίνησης ενός πλοίου μεταξύ αυτών.

Λέξεις κλειδιά : dynamic positioning, υπεράκτιο αιολικό πάρκο, ανάλυση δεδομένων, αλγόριθμος δρομολόγησης

1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της εργασίας

Η Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση έχει οδηγήσει στη ραγδαία εξέλιξη πληθώρας κλάδων, ανάμεσα στους οποίους βρίσκεται και αυτός της ναυτιλίας. Ειδικότερα, η συλλογή και η επεξεργασία δεδομένων, συνέβαλαν στην περαιτέρω ανάπτυξη συστημάτων πλοήγησης και δυναμικής τοποθέτησης των πλοίων (Dynamic Positioning Systems). Τα χρησιμοποιούμενα δεδομένα, τα οποία αφορούν συνήθως τις καιρικές συνθήκες, τη θέση και τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός πλοίου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν όχι μόνο για τη διατήρηση της πορείας τους, αλλά και για τη δρομολόγησή τους.

Η δρομολόγηση των σκαφών είναι ένα ζήτημα το οποίο απασχολεί αρκετά τους κατασκευαστές υπεράκτιων αιολικών πάρκων (Offshore Wind Farms). Ειδικότερα, για τη δρομολόγηση πλοίων σε ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο πρέπει να ληφθούν υπόψη αρκετοί παράγοντες, όπως ο καιρός, η μηχανή του πλοίου, η σύνδεση των ανεμογεννητριών μεταξύ τους, κάθε πότε είναι αναγκαία η συντήρηση κάθε ανεμογεννήτριας καθώς και πλήθος περαιτέρω συνθηκών. Βέβαια, το σημαντικότερο κώλυμα όσον αφορά τη δρομολόγηση πλοίων σε ένα τέτοιο περιβάλλον αποτελεί το απαιτούμενο καύσιμο των πλοίων, διότι δαπανούνται σημαντικά ποσά στην αγορά αυτού. Επομένως, είναι απαραίτητο η δρομολόγηση των πλοίων σε ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο να πραγματοποιείται βάσει της αποτελεσματικής κατανάλωσης καυσίμων. Μέχρι στιγμής δεν έχει δοθεί μια αποδοτική λύση ως προς το ζήτημα αυτό, αλλά η παρούσα διπλωματική εργασία προτείνει ένα τρόπο αντιμετώπισης του παραπάνω προβλήματος.

Η παρούσα διπλωματική εργασία προτείνει την αποτελεσματική δρομολόγηση των πλοίων σε ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο, λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα καιρού και θέσης αυτών και μοντελοποιώντας το θαλάσσιο αιολικό πάρκο ως συνδεδεμένο γράφο. Ο γράφος αυτός, τελικά, απεικονίζει ως κόμβους τις ανεμογεννήτριες και ως ακμές το κόστος μετακίνησης ενός πλοίου μεταξύ αυτών.

1.2 Δομή της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη: τη βιβλιογραφική ανασκόπηση και την προτεινόμενη προσέγγιση.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση περιλαμβάνει τα κεφάλαια:

- ≈ Συστήματα Δυναμικής Τοποθέτησης (Dynamic Positioning)
- ≈ Μηχανική Μάθηση (Machine Learning)
- ≈ Διαχείριση Κατανάλωσης Καυσίμων & Ανάλυση Δεδομένων
- ≈ Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα (Offshore Wind Farms)

Η προτεινόμενη προσέγγιση περιλαμβάνει το σύνολο δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε, την προεπεξεργασία που εφαρμόστηκε στο σύνολο αυτό, την επιλογή χαρακτηριστικών που πραγματοποιήθηκε στα δεδομένα, τον προτεινόμενο αλγόριθμο δρομολόγησης των πλοίων που εκτελούν εργασίες εντός ενός θαλάσσιου αιολικού πάρκου και, την αντίστοιχη διεπαφή χρήστη που υλοποιήθηκε για τη χρήση του αλγόριθμου δρομολόγησης της εργασίας. Τέλος παρατίθενται τα συμπεράσματα τις εργασίας, όπου συνοψίζονται τα πεπραγμένα αυτής και προτείνονται πιθανές βελτιώσεις.

2. Συστήματα Δυναμικής Τοποθέτησης (Dynamic Positioning)

2.1 Ορισμός και Ιστορική Αναδρομή

Το σύστημα Δυναμικής Τοποθέτησης (Dynamic Positioning / DP) δίνει τη δυνατότητα σε οποιαδήποτε πλωτή κατασκευή είτε αυτή είναι ένα πλοίο, είτε μια πλατφόρμα εξόρυξης, να διατηρήσει τη θέση και την προκαθορισμένη πορεία της με την χρήση αποκλειστικά και μόνο των προπελών και των προωθητήρων της [1].



Εικόνα 1: Eureka, 1961. Το πρώτο πλοίο με τεχνολογία Dynamic Positioning

Η σύλληψη της ιδέας για το μηχανισμό Dynamic Positioning –και κατά συνέπεια το πρώτο μοντέλο- προήλθε από τον ηλεκτρολόγο μηχανικό Howard Shatto κατά τη δεκαετία του 1960. Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο πλωτό όχημα που έφερε την τεχνολογία Dynamic Positioning ήταν το ‘Eureka’ (Εικόνα 1 [2]), ένα μικρό γεωτρήπανο της πετρελαϊκής εταιρείας Shell, το οποίο προοριζόταν για πραγματοποίηση εξορύξεων από τον πυθμένα της θάλασσας σε μεγάλο βάθος (deepwater coring). [2] Η πρώτη απόπειρα, όπως φαίνεται στην **Error! Reference source not found.**, επεξεργαζόταν μόνο κινήσεις οριζόντιας κατεύθυνσης, όπως το κύμα/φουσκοθαλασσιά (surge), την ταλάντευση (sway) και την στροφική οριζόντια κίνηση (yaw) του πλωτού οχήματος

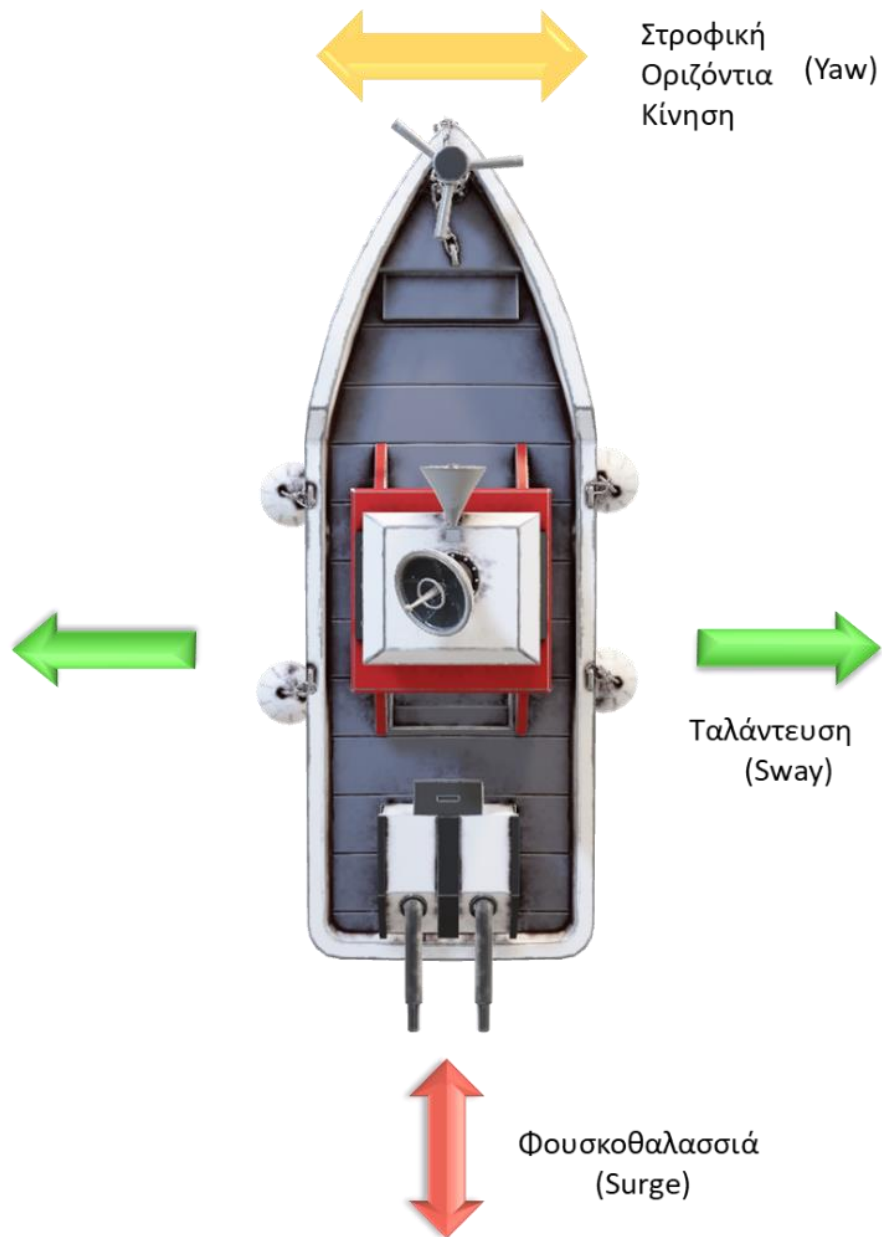
με τη χρήση αλγορίθμου PID¹ μονής εισόδου και εξόδου σε συνδυασμό με notch filter². [4]. Δέκα περίπου χρόνια αργότερα, υλοποιήθηκε ένα πιο εξελιγμένο σύστημα DP, με πιο ανεπτυγμένα χειριστήρια και μεθόδους wave filtering, όπως το φίλτρο Kalman (Kalman Filtering), το οποίο θα αναλυθεί παρακάτω [5]. Το Kalman Filtering, με τη σειρά του, αποτέλεσε καινοτομία στον χώρο της ναυσιπλοΐας, καθότι πολλές βελτιώσεις του Dynamic Positioning μέχρι σήμερα, στηρίζονται στην θεωρία αυτή. Μεταξύ του 1990 και του 2000 οι προτάσεις για περαιτέρω αναβάθμιση των DP συστημάτων πλήθαιναν τόσο σε επίπεδο λογισμικού, όσο και σε επίπεδο μηχανισμού. Η επικρατέστερη πρόταση αφορούσε τον σχεδιασμό και την υλοποίηση μη γραμμικών³ (non-linear) Dynamic Positioning συστημάτων που λάμβαναν διαφορετικής μορφής δεδομένα από περισσότερες από μια -διαφορετικές- πηγές και, βάσει αυτών, υπολόγιζαν την πορεία του πλοίου και διόρθωναν ενδεχόμενες αποκλίσεις. Την ίδια περίοδο, άρχισε να δίνεται έμφαση και στην εφαρμογή του Dynamic Positioning σε τηλεχειριζόμενα οχήματα και αυτόνομα υποβρύχια οχήματα (Autonomous Underwater Vehicles)/ AUVs) [6].

¹ Proportional-Integral-Derivative (PID) control algorithm: αλγόριθμος ο οποίος 'διαβάζει' έναν αισθητήρα και στη συνέχεια υπολογίζει το αποτέλεσμα εξόδου (output) σε μια μεταβλητή, αθροίζοντας αναλογικές (proportional), ολοκληρωτικές (integral) και παράγωγες αποκρίσεις (derivative responses). [2]

² Notch Filter: φίλτρο που 'λεπταίνει' τα σήματα σε μια πολύ στενή ζώνη συχνοτήτων. [3]

³ Σε ένα μη γραμμικό μοντέλο, η αλλαγή του αποτελέσματος δεν είναι ανάλογη με την μεταβολή των παραμέτρων. Διαγραμματικά, σχηματίζεται μια καμπύλη.

Αλγόριθμος Δρομολόγησης Πλοίων Διεργασιών Υπεράκτιου Αιολικού Πάρκου για τη Διαχείριση Καυσίμων



Εικόνα 2: Κινήσεις ενός πρώιμου συστήματος *Dynamic Positioning*

Η εξέλιξη των DP συστημάτων δεν σταμάτησε εκεί. Αντιθέτως, οι έρευνες συνεχίζονται και οι νέες προτάσεις χρήσης και βελτίωσης των συστημάτων αυτών όλο και πληθαίνουν · η χρήση ενός υβριδικού συστήματος Dynamic Positioning αποτελεί μια από τις πιο πρόσφατες προτάσεις του κλάδου αυτού.

Τα συστήματα DP να μεν συμβάλλουν σημαντικά στην καλύτερη και αποτελεσματικότερη πλοήγηση πλωτών μηχανισμών και πλοίων αλλά, είναι σχεδιασμένα ώστε να λειτουργούν έως ένα συγκεκριμένο όριο καιρικών συνθηκών το οποίο επηρεάζεται από την ισχύ της εκάστοτε κατασκευής. Για αυτό το λόγο, άρχισε να δίνεται ερευνητική έμφαση σε πιθανούς τρόπους ενσωμάτωσης διαφόρων συστημάτων ελέγχου (vessel control systems), λαμβάνοντας υπόψη επιχειρησιακές απαιτήσεις, με στόχο τη βελτίωση του σχεδιασμού των συστημάτων πλοήγησης -τόσο σε επίπεδο software όσο και επίπεδο hardware- και της απόδοσης της κατασκευής γενικότερα. Έτσι, προέκυψαν τα υβριδικά συστήματα DP τα οποία απαρτίζονται από πληθώρα διαφορετικών χειριστηρίων και μοντέλων/λογισμικών, ενοποιημένα σε ένα νέο και ενιαίο σύστημα πλοήγησης DP, το οποίο αποσκοπεί στην αποδοτική λειτουργία της πλωτής κατασκευής σε διάφορες ή/και μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες, σε πλήθος επιχειρηματικών απαιτήσεων. Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελεί η μοντελοποίηση ενός υβριδικού DP συστήματος για σκάφη που δραστηριοποιούνται σε ακραίες καιρικές συνθήκες και πάγο · παρατηρήθηκε ότι ο καιρός δεν αποτέλεσε ανασταλτικό παράγοντα των διεργασιών, με αποτέλεσμα να καθίσταται εφικτή η εκπόνηση εργασιών όλο το χρόνο, ανεξαρτήτως ακραίων καιρικών συνθηκών. [7][7]

2.2 Το σύστημα

Η περαιτέρω έρευνα που παρατηρείται τη σημερινή εποχή στον κλάδο της ναυσιπλοΐας και ιδίως σε ό,τι αφορά τα Dynamic Positioning συστήματα (Dynamic Positioning System(s) / DPS), έχει οδηγήσει σε έναν καταγισμό από διαφορετικά συστήματα πλοήγησης τα οποία εξυπηρετούν πληθώρα κριτηρίων και απαιτήσεων. Παρόλα αυτά, κάθε DPS αποτελείται από τα εξής τρία (3) υποσυστήματα: το σύστημα ελέγχου (DP Control System), το σύστημα Προωθητήρων (Thruster System) και το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (Power Management System / PMS). [8]

2.2.1 Σύστημα Ελέγχου (DP Control System)

Το Σύστημα Ελέγχου απαρτίζεται από τις υλικοτεχνικές υποδομές που συμβάλλουν στην λήψη και διαχείριση των δεδομένων αναφορικά με τη θέση και το περιβάλλον μιας πλωτής κατασκευής, όπως [8] :

- ≈ Υπολογιστικά/Joystick συστήματα
- ≈ Αισθητήρες (γυροσκόπια, αισθητήρες αέρα, μονάδες αναφοράς κίνησης κ.ο.κ.)
- ≈ Συστήματα αναφοράς θέσης (π.χ. Global Navigation Satellite Systems/GNSS, υδροακουστικά συστήματα, συστήματα laser) · σε αυτά υπάγεται οτιδήποτε -είτε υλικό (hardware), είτε λογισμικό (software), είτε αισθητήρας- το οποίο μπορεί να προσφέρει δεδομένα και τυχόν διορθώσεις για τη θέση του πλοίου.
- ≈ Υλικές υποδομές εμφάνισης πληροφορίας και panels χειρισμού (Display System & operator panels)
- ≈ Κατάλληλη καλωδίωση και δρομολόγηση (routing) αυτών

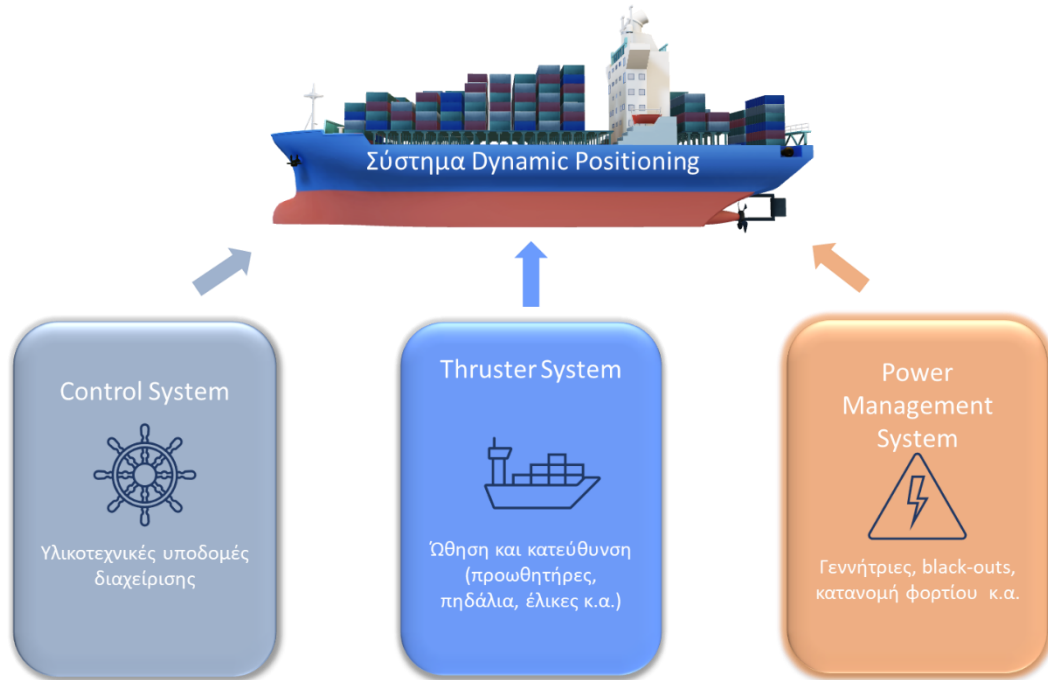
2.2.2 Σύστημα Προωθητήρων (Thruster System)

Το υποσύστημα αυτό περιλαμβάνει όλα τα εξαρτήματα και συστήματα τα οποία προσφέρουν ώθηση και κατεύθυνση. Στο σύστημα ώθησης συγκαταλέγονται προωθητήρες και απαραίτητα βοηθητικά συστήματα όπως σωληνώσεις, έλικες και πηδάλια που βρίσκονται υπό τον έλεγχο του DP συστήματος. [8]

2.2.3 Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (Power Management System / PMS)

Το συγκεκριμένο υποσύστημα αναπτύχθηκε για τη διαχείριση των γεννητριών ενός σκάφους, την πρόληψη συσκότισης (black-out), καθώς και για την κατανομή και απόρριψη φορτίου (load sharing/shedding). [8]

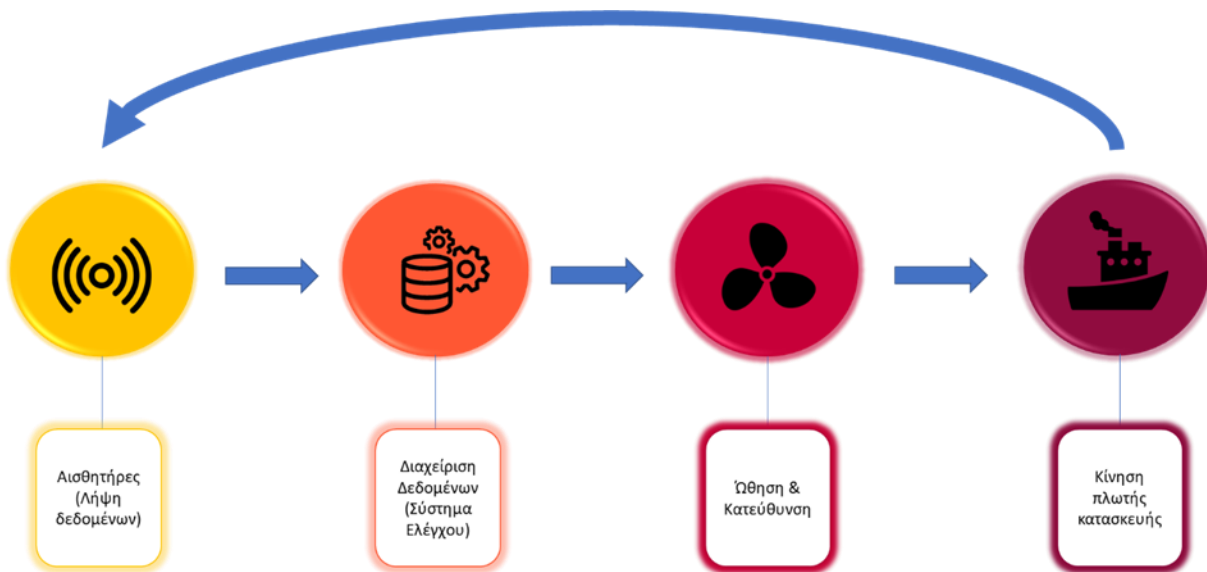
Τα παραπάνω υποσυστήματα απεικονίζονται συνοπτικά στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3: Υποσυστήματα Dynamic Positioning

2.3 Λειτουργία

Τα προαναφερθέντα υποσυστήματα συντελούν στην διατήρηση ή/και στη διόρθωση της πορείας ενός σκάφους · προκειμένου όμως να είναι εφικτή η ομαλή κίνηση μιας πλωτής κατασκευής σε ανοιχτά νερά, τα DP συστήματα ακολουθούν μια ροή εργασιών η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4: Τρόπος λειτουργίας ενός Dynamic Positioning συστήματος

Αρχικά, λαμβάνονται δεδομένα θέσης και περιβαλλοντικών συνθηκών (ένταση και φορά αέρα, βάθος θάλασσας κ.α.) τα οποία επηρεάζουν την πορεία και την κίνηση του σκάφους. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια του συστήματος ελέγχου, γίνεται επεξεργασία των δεδομένων αυτών έτσι ώστε να παραχθεί η απαραίτητη πληροφορία με στόχο την ομαλή συνέχεια της πορείας του πλοίου. Έπειτα, με τη βοήθεια του συστήματος προωθητήρων, μετά την κατάλληλη διαχείριση των δεδομένων διατηρείται ή διορθώνεται η δύναμη ώσης και η κατεύθυνση του πλωτού έτσι ώστε, τελικά, να εμείνει την ομαλή του κίνηση και πορεία στη θάλασσα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται συνεχώς, για όσο διάστημα βρίσκεται το σκάφος εν κινήσει.

Πρέπει να τονιστεί πως οι διεργασίες ενός τέτοιου συστήματος διαχωρίζονται περαιτέρω σε ξεχωριστές διαδικασίες, οι οποίες περιγράφονται παρακάτω [8] :

- ≈ **Επεξεργασία σήματος (Signal Processing):** Όλα τα σήματα από εξωτερικούς αισθητήρες θα πρέπει να αναλύονται διεξοδικά και να ελέγχονται σε ξεχωριστή μονάδα επεξεργασίας σήματος. Η ανάλυση περιλαμβάνει έλεγχο των μεμονωμένων σημάτων και στάθμιση μετρήσεων σε περίπτωση που λήφθηκαν και περιττές μετρήσεις.
- ≈ **Παρατηρητής Σκάφους (Vessel Observer):** Προγνωστικός δείκτης (predictor) που αφορά το wave filtering⁴ και την εκτίμηση θέσης. Ειδικότερα, σε περίπτωση απώλειας μετρήσεων κάποιου αισθητήρα, χρησιμοποιείται για νεκρή καταμέτρηση⁵ (dead reckoning).
- ≈ **Λογική Ελεγκτή (Controller Logic):** Το σύστημα DP μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πλήθος διεργασιών (modes). Όλα τα είδη χειρισμού εσωτερικών συστημάτων (internal system status handling) καθώς και οι μεταβάσεις λειτουργίας (mode transitions), η προσαρμογή μοντέλου (mode adaptation) κ.λπ. διέπονται από τη λογική του ελεγκτή. Αυτή διασφαλίζει τις ομαλές μεταβάσεις μεταξύ των διαφορετικών τρόπων λειτουργίας, την ένδειξη προειδοποιήσεων και την εύκολη αλληλεπίδραση με τον χειριστή.
- ≈ **Νόμος Ελέγχου Ανατροφοδότησης (Feedback Control Law):** Σύστημα υπεύθυνο για διορθώσεις ενδεχόμενων αποκλίσεων της εκτιμώμενης θέσης (position), πορείας (heading) και ταχύτητας (velocity).
- ≈ **Σύστημα Καθοδήγησης και Τροχιές Αναφοράς (Guidance System & Reference Trajectories):** Σε περιπτώσεις όπου το σκάφος μετακινείται από μια θέση και κατευθύνεται σε μια άλλη, απαιτείται ένα μοντέλο αναφοράς για την επίτευξη ομαλής μετάβασης. Στην πιο βασική περίπτωση, ο χειριστής καθορίζει μια νέα επιθυμητή κατεύθυνση και το μοντέλο αναφοράς δημιουργεί ομαλές τροχιές για να ακολουθήσει το σκάφος. Ένα πιο προηγμένο σύστημα καθοδήγησης περιλαμβάνει λειτουργία

⁴ Wave Filtering / Φιλτράρισμα Κύματος: βασική λειτουργία ενός συστήματος Dynamic Positioning. Είναι υπεύθυνο για το διαχωρισμό μεταξύ κυμάτων υψηλής και χαμηλής συχνότητας. [9] **Error! Reference source not found.**

⁵ Dead Reckoning / Νεκρή Καταμέτρηση: η διαδικασία υπολογισμού της τρέχουσας θέσης κάποιου κινούμενου αντικειμένου χρησιμοποιώντας μια προηγούμενης καθορισμένη θέση και στη συνέχεια ενσωματώνοντας εκτιμήσεις της ταχύτητας, της κατεύθυνσης και της πορείας για το χρόνο που έχει περάσει. [10]

εντοπισμού σημείου διαδρομής (way-point tracking), βέλτιστο σχεδιασμό διαδρομής (path planning) και **δρομολόγηση καιρού (weather routing)**.

- ≈ **Κατανομή Ώθησης (Thrust Allocation):** Βάσει των μετρήσεων που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια της ανατροφοδότησης για το κύμα (surge), την ταλάντευση (sway) και τη στροφική οριζόντια κίνηση (yaw) του σκάφους, γίνεται η αντίστοιχη κατανομή ώθησης ούτως ώστε το πλοίο να διατηρεί την πορεία του.
- ≈ **Προσαρμογή Μοντέλου (Model Adaptation):** Η δυναμική του σκάφους περιγράφεται βάσει μαθηματικών παραμέτρων, οι οποίες διαφέρουν ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Στηριζόμενο στο μαθηματικό μοντέλο που προκύπτει, ένα σύστημα DP θα πρέπει να προσαρμόζεται και να διορθώνει αυτόματα τις μετρήσεις που επηρεάζονται από αλλαγές στο βύθισμα του σκάφους (vessel draught), στην περιοχή ανέμου (wind area) και στις διακυμάνσεις της κατάστασης της θάλασσας (sea state variations).[8]

Οι προαναφερθείσες διεργασίες αποτελούν ένα βασικό DPS, του οποίου οι λειτουργίες συνοψίζονται στον Πίνακα 1.

Βασικές Λειτουργίες ενός DP Συστήματος
1. Υπολογισμός κίνησης (motion) του σκάφους
2. Εκτίμηση της 'απόκρισης'/αντίδρασης (response) του σκάφους
3. Προσδιορισμός σφάλματος μεταξύ πρόβλεψης (prediction) και πραγματικής μέτρησης (measurement)
4. Διορθώσεις πορείας/κίνησης
5. Εκχώρηση κατάλληλων εντολών στους προωθητήρες και διατήρηση πορείας

Πίνακας 1: Βασικές Λειτουργίες Ενός DP Συστήματος

2.4 Χρησιμότητα

Η ανακάλυψη και η εξέλιξη της τεχνολογίας Δυναμικής Τοποθέτησης / Dynamic Positioning έχει οδηγήσει αρκετές κατασκευαστικές εταιρείες πλοίων στην χρήση του συστήματος αυτού στους στόλους τους. Είτε γίνεται λόγος για βυθοκόρους (dredgers), είτε για τηλεχειριζόμενα σκάφη, είτε για πλατφόρμες εξόρυξης, είτε ακόμη και για επιβατικά πλοία, τα συστήματα Dynamic Positioning χρησιμοποιούνται ευρέως. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ένα τέτοιο σύστημα διατηρεί την πορεία ενός σκάφους μέσω της συλλογής περιβαλλοντικών δεδομένων και δεδομένων θέσης, η λήψη των οποίων γίνεται μέσω διάφορων συστημάτων αναφοράς θέσης και μέσω του εκάστοτε εσωτερικού συστήματος μοντελοποίησης που στηρίζεται στα χαρακτηριστικά του εκάστοτε σκάφους · αυτό το σύστημα μετατρέπει τις μετρήσεις του συστήματος αναφοράς θέσης σε πληροφορία που μπορεί να επεξεργαστεί το σύστημα Dynamic Positioning (ουσιαστικά, γίνεται λόγος για προεπεξεργασία δεδομένων). Μια τέτοιου είδους τεχνολογία, όπως αυτή του Dynamic Positioning, διαθέτει περισσότερα οφέλη σε σχέση με παλαιότερες τεχνολογίες πλοήγησης σαν το σύστημα αγκυροβόλησης (mooring system), για παράδειγμα. Αρχικά, προσφέρει άμεση λήψη και επανατοποθέτηση θέσης (position acquiring & reacquiring) σε σχέση με παλαιότερα συστήματα όπου θα χρειαζόταν φυσική επανατοποθέτηση της άγκυρας. [11] Έπειτα, δεν τίθεται ζήτημα για το μέγιστο βάθος δρομολόγησης ενός σκάφους. Αντίθετα, οι άγκυρες βυθίζονται μέχρι ένα συγκεκριμένο σημείο. Τέλος, τα συστήματα Dynamic Positioning παρέχουν ακριβείς συντεταγμένες θέσης και πορείας, καθώς και έλεγχο αυτών, σε αντίθεση με προγενέστερες τεχνολογίες που βασίζονταν περισσότερο σε εκτιμήσεις και στον ανθρώπινο παράγοντα. Βέβαια, η τεχνολογία Dynamic Positioning έχει και τα μειονεκτήματά της. Κατ' αρχάς, είναι απαραίτητο το σκάφος να τηρεί συγκεκριμένες προδιαγραφές (π.χ. ισχύς προωθητήρων) για να λειτουργήσει με το σύστημα αυτό, που σημαίνει ότι δεν μπορούν όλες οι πλωτές κατασκευές να υποστηρίξουν ένα σύστημα Δυναμικής Τοποθέτησης. Στη συνέχεια, είναι αρκετά κοστοβόρο · ο σχεδιασμός και η εγκατάσταση του συστήματος είναι δαπανηροί. Επίσης, καταναλώνονται αρκετά καύσιμα προκειμένου το σκάφος να διατηρήσει την πορεία του. Επιπρόσθετα, η συντήρηση ενός τέτοιου συστήματος είναι πολυδάπανη εξαιτίας της υψηλής πολυπλοκότητάς του. Τέλος, καθίσταται δυσκολότερη η πλοήγηση του πλωτού σε ενδεχόμενο βλάβης του συστήματος.

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα χρήσης του Dynamic Positioning παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 2 που ακολουθεί.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης Dynamic Positioning	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Άμεση λήψη συντεταγμένων θέσης	Το σκάφος πρέπει να πληροί συγκεκριμένες προδιαγραφές για την χρήση DP
Άμεση επανατοποθέτηση θέσης	Δαπανηρό σύστημα (σχεδιασμός, καύσιμα, συντήρηση συστήματος)
Δεν υπάρχει περιορισμός μέγιστου βάθους λειτουργίας	Δύσκολη πλοήγηση σε περίπτωση βλάβης του συστήματος.

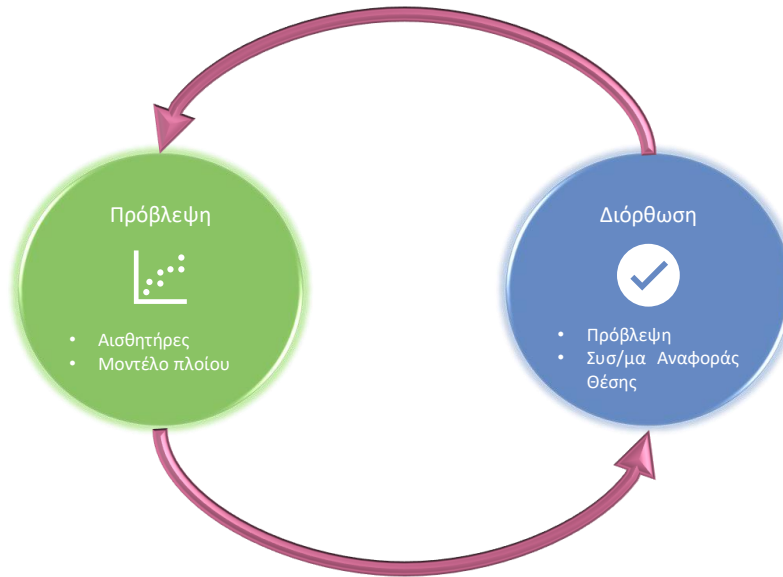
Πίνακας 2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης Dynamic Positioning

2.5 Kalman Filtering

Το σύστημα Dynamic Positioning, χρησιμοποιεί αισθητήρες και συστήματα αναφοράς θέσης (Position Reference Systems / PRS) για να υπολογίσει την κατάσταση του πλοίου (state). Είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη και να προσδιοριστούν οι μεταβλητές κίνησης, δηλαδή η θέση και η ταχύτητα του πλωτού οχήματος, καθώς και οι περιβαλλοντικές μεταβλητές που επηρεάζουν την κίνηση αυτού. Πιο συγκεκριμένα, η κατάσταση του σκάφους εξαρτάται από τη θέση (position), τη ταχύτητα (σε ταλάντευση-sway, φουσκοθαλασσιά-surge και εκτροπή-yaw), την πορεία (heading), και το ρεύμα σταθερής κατάστασης της θάλασσας (steady-state current). Βέβαια, οι μετρήσεις που καλείται να επεξεργαστεί ένα σύστημα DP περιέχουν θόρυβο, ο οποίος εξαρτάται από τους ίδιους τους αισθητήρες και τα συστήματα αναφοράς θέσης, καθώς και το πώς υπολογίζουν την εκάστοτε μέτρηση.[12] Λόγω αυτού του προβλήματος τίθεται το ερώτημα του πώς είναι εφικτό να εκτιμηθεί αποτελεσματικά η κατάσταση ενός πλοίου βάσει θορυβωδών μετρήσεων από τα παραπάνω συστήματα και αισθητήρες. Το ερώτημα αυτό απαντάται από το Kalman Filter.

Το Kalman Filter δημοσιεύθηκε για πρώτη φορά το 1960 από τον R.E. Kalman, ο οποίος το παρουσίασε ως μια λύση στο πρόβλημα του γραμμικού φιλτραρίσματος διακριτών δεδομένων⁶ (discrete data). [13] Το Kalman Filter χωρίζεται σε δύο (2) φάσεις, την πρόβλεψη (prediction) και τη διόρθωση (correction). [14] Στην πρώτη φάση, προβλέπεται η κατάσταση του πλοίου βάσει των πιο πρόσφατων μετρήσεων των αισθητήρων και του μαθηματικού μοντέλου του σκάφους που έχει δημιουργηθεί, όπως αναφέρεται στην ενότητα 2.3 · καθορίζεται μια εκ των προτέρων εκτίμηση της κατάστασης (a priori state estimation) του πλοίου η οποία είναι απαραίτητη για την επόμενη φάση. Το επόμενο μέρος της διαδικασίας, αυτό της διόρθωσης, αφορά τυχόν διορθώσεις ή ενημερώσεις (updates) της αρχικής πρόβλεψης, βάσει των μετρήσεων του συστήματος αναφοράς θέσης, παράγοντας κατά αυτό τον τρόπο μια νέα -εκ των υστέρων (posteriori)- εκτίμηση κατάστασης του σκάφους.

⁶ Το γραμμικό φιλτράρισμα έχει σχέση με τα γραμμικά μοντέλα που συναντώνται στα μαθηματικά. Σε ένα τέτοιο γραμμικό μοντέλο, το αποτέλεσμα αυτού μεταβάλλεται ανάλογα με το πώς μεταβάλλονται οι παράμετροι.



Εικόνα 5: Διαδικασία Kalman Filtering

Η Εικόνα 5 απεικονίζει διαγραμματικά τη λειτουργία του Kalman Filter. Αναλυτικότερα, στην αρχή προβλέπεται η κατάσταση και η θέση του πλωτού οχήματος με την χρήση των τελευταίων μετρήσεων των αισθητήρων και του ήδη ανεπτυγμένου μαθηματικού μοντέλου του οχήματος. Έπειτα, οι μετρήσεις που λαμβάνονται από το σύστημα αναφοράς θέσης, συμβάλλουν στην διόρθωση ή στη διατήρηση της πορείας και της θέσης του σκάφους. Η ενημέρωση της κατάστασης του πλοίου γίνεται κατά τη φάση της διόρθωσης, όπου συγκρίνονται τα αποτελέσματα της πρόβλεψης με αυτά του συστήματος αναφοράς θέσης. Τέλος οι μετρήσεις της διόρθωσης αντικαθιστούν αυτές της πρόβλεψης, μέχρι να ληφθούν οι επόμενες μετρήσεις αισθητήρων και θέσης. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται όσο το πλωτό όχημα βρίσκεται σε κατάσταση πλεύσης.

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να σημειωθεί πως ο αλγόριθμος του Kalman Filter επεξεργάζεται μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο και λειτουργεί αναδρομικά. Αυτό σημαίνει πως κάθε καινούρια εκτίμηση/πρόβλεψη περιλαμβάνει και τις προηγούμενες μετρήσεις. Χάρη στο σχεδιασμό αυτό, δεν χρειάζεται να αποθηκεύεται κάθε προηγούμενη μέτρηση ξεχωριστά με αποτέλεσμα, είτε γίνεται λόγος για την πρώτη, είτε την τελευταία μέτρηση, να γίνεται ενημέρωση της πορείας στον αποτελεσματικότερο δυνατό χρόνο. [14]

Η τεχνολογική άνθιση που λαμβάνει χώρα στη σύγχρονη εποχή, έχει οδηγήσει στην βελτίωση του ήδη υπάρχοντος Kalman Filter καθώς και στην ανάπτυξη νέων μεθόδων του, όπως το Extended Kalman Filtering και το Unscented Kalman Filtering. Το Extended Kalman Filter (EKF) αποτελεί επέκταση του κλασικού Kalman Filter, αλλά χρησιμοποιείται όταν γίνεται λόγος για μη-γραμμικά συστήματα. [15] Από την άλλη πλευρά, το Unscented Kalman Filter (UKF) είναι η εξέλιξη της προγενέστερης μεθόδου. Αυτό το είδος φιλτραρίσματος αντί να βασίζεται στην χρήση μίας παρατήρησης, όπως το αρχικό Kalman Filter, χρησιμοποιεί ένα σύνολο μετρήσεων (Sigma Points) για να εξετάσει την κατάσταση του σκάφους. [16]

3. Μηχανική Μάθηση (Machine Learning)

Οι αναβαθμίσεις που αποτελούν απόρροια της Τέταρτης (4^{ης}) Βιομηχανικής Επανάστασης (Industry 4.0) δεν απαντώνται μόνο στον τομέα της ναυσιπλοΐας, αλλά συναντώνται παντού. Ειδικότερα, η τρέχουσα περίοδος χαρακτηρίζεται από εξελίξεις όχι μόνο σε πρακτικές παραγωγής, αλλά και στη διερευνητική επεξεργασία δεδομένων (exploratory data processing) με την χρήση έξυπνων τεχνολογιών, όπως η μηχανική μάθηση (machine learning / ML).

Αρχικά, η μηχανική μάθηση χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, τη μη-εποπτευόμενη μάθηση (unsupervised learning) και την εποπτευόμενη μάθηση (supervised learning). Στη μη εποπτευόμενη μάθηση χρησιμοποιούνται και αναλύονται μη επισημασμένα σύνολα δεδομένων (unlabeled datasets) με στόχο την εύρεση τάσεων (trends), ομαδοποιήσεων (groupings) και μοτίβων (patterns) των δεδομένων, χωρίς την εμπλοκή του ανθρώπινου παράγοντα. Η εποπτευόμενη μάθηση, από την άλλη, είναι μια υποκατηγορία της μηχανικής μάθησης, η οποία ορίζεται από τη χρήση επισημασμένων συνόλων δεδομένων (labeled datasets) για την εκπαίδευση αλγορίθμων που στοχεύουν στην ακριβή ταξινόμηση δεδομένων ή στην πρόβλεψη αποτελεσμάτων -βάσει του εκάστοτε συνόλου δεδομένων- με τη βοήθεια του ανθρώπινου παράγοντα. Η παρούσα εργασία, για παράδειγμα, αξιοποιεί τεχνικές επιλογής χαρακτηριστικών -η οποία υπάγεται στην εποπτευόμενη μάθηση⁷- για την ορθή ανάπτυξη μίας σχέσης μεταξύ καιρικών δεδομένων και πορείας πλοίων. Ο ορισμός της επιλογής χαρακτηριστικών και των αντίστοιχων -ενδεικτικών- τεχνικών της, παρουσιάζεται παρακάτω :

≈ **Επιλογή Χαρακτηριστικών (Feature Selection)**: Υποκατηγορία της εποπτευόμενης μάθησης. Αποτελεί διαδικασία επιλογής ενός υποσυνόλου μοναδικών χαρακτηριστικών (μεταβλητές) για την ανάπτυξη ενός ML μοντέλου. Μειώνει την πολυπλοκότητα ενός μοντέλου εξαλείφοντας τα λιγότερο σημαντικά χαρακτηριστικά και επιτρέπει την ταχύτερη εκπαίδευση των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης. Ένα σωστό και βέλτιστο υποσύνολο των επιλεγμένων χαρακτηριστικών είναι ικανό να ελαχιστοποιήσει το πρόβλημα υπερπροσαρμογής⁸ (overfitting) μέσω της απλοποίησης και γενίκευσης του μοντέλου, αυξάνοντας παράλληλα την ακρίβεια αυτού. [17]

≈ **Συσχέτιση Pearson (Pearson Correlation)**: Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για την εύρεση της συσχέτισης μεταξύ των χαρακτηριστικών σε ένα σύνολο δεδομένων. Η τιμή που προκύπτει είναι μεταξύ $[-1, 1]$, όπου -1 σημαίνει τέλεια αρνητική συσχέτιση, $+1$ σημαίνει τέλεια θετική συσχέτιση και 0 σημαίνει ότι οι δύο μεταβλητές δεν έχουν γραμμική συσχέτιση. [17] Η περαιτέρω επεξήγηση των αποτελεσμάτων της συσχέτισης Pearson, παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.

⁷ Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν μεταβλητές ενδιαφέροντος (π.χ. μεταβλητή προς πρόβλεψη – target variable), τότε η επιλογή χαρακτηριστικών υπάγεται στην μη εποπτευόμενη μάθηση.

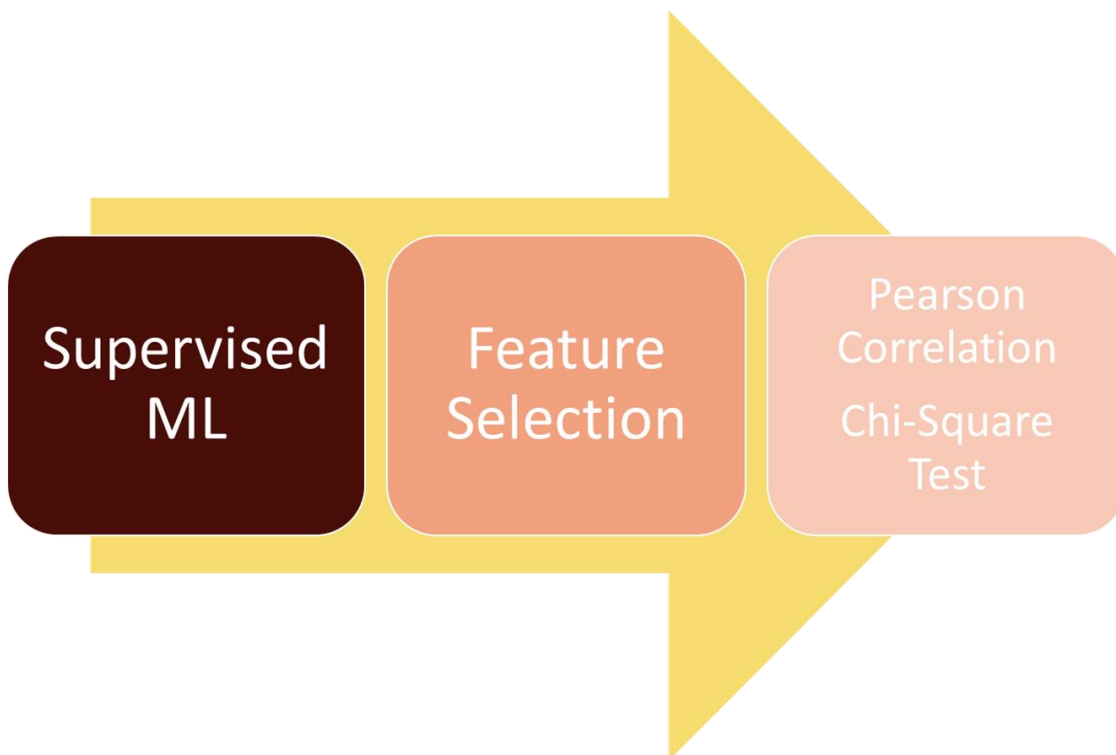
⁸ Υπερπροσαρμογή / Overfitting: το φαινόμενο κατά το οποίο ένας αλγόριθμος ML έχει εκπαιδευτεί τόσο καλά σε ένα συγκεκριμένο dataset, με αποτέλεσμα να καθίσταται ανακριβής οποιαδήποτε άλλη πρόβλεψη σε διαφορετικό dataset. Η υπερπροσαρμογή καταπολεμάται με την προσθήκη επιπλέον στοιχείων σε έναν ML αλγόριθμο.

≈ **Τεστ χ^2 (Chi-Square / χ^2 Test)**: χρησιμοποιείται για τον έλεγχο ανεξαρτησίας μεταξύ δύο μεταβλητών. Ειδικότερα, εξετάζει το πόσο αποκλίνουν δύο αυτές μεταβλητές μεταξύ τους. [17]

Τιμή	Επεξήγηση Τιμής
-1	Τέλεια αρνητική σχέση. Οι μεταβλητές μεταβάλλονται αντίθετα η μία από την άλλη. Για παράδειγμα, αν η μεταβλητή X αυξηθεί, τότε η μεταβλητή Y θα μειωθεί.
1	Τέλεια θετική σχέση. Οι μεταβλητές μεταβάλλονται προς την ίδια κατεύθυνση. Για παράδειγμα, αν η μεταβλητή X αυξηθεί, τότε και η μεταβλητή Y θα αυξηθεί.
0	Οι δύο μεταβλητές δεν έχουν γραμμική σχέση.

Πίνακας 3: Επεξήγηση Τιμών Συσχέτισης Pearson

Οι προαναφερθέντες ορισμοί και ενδεικτικές τεχνικές παρουσιάζονται διαγραμματικά στην ακόλουθη Εικόνα 6.



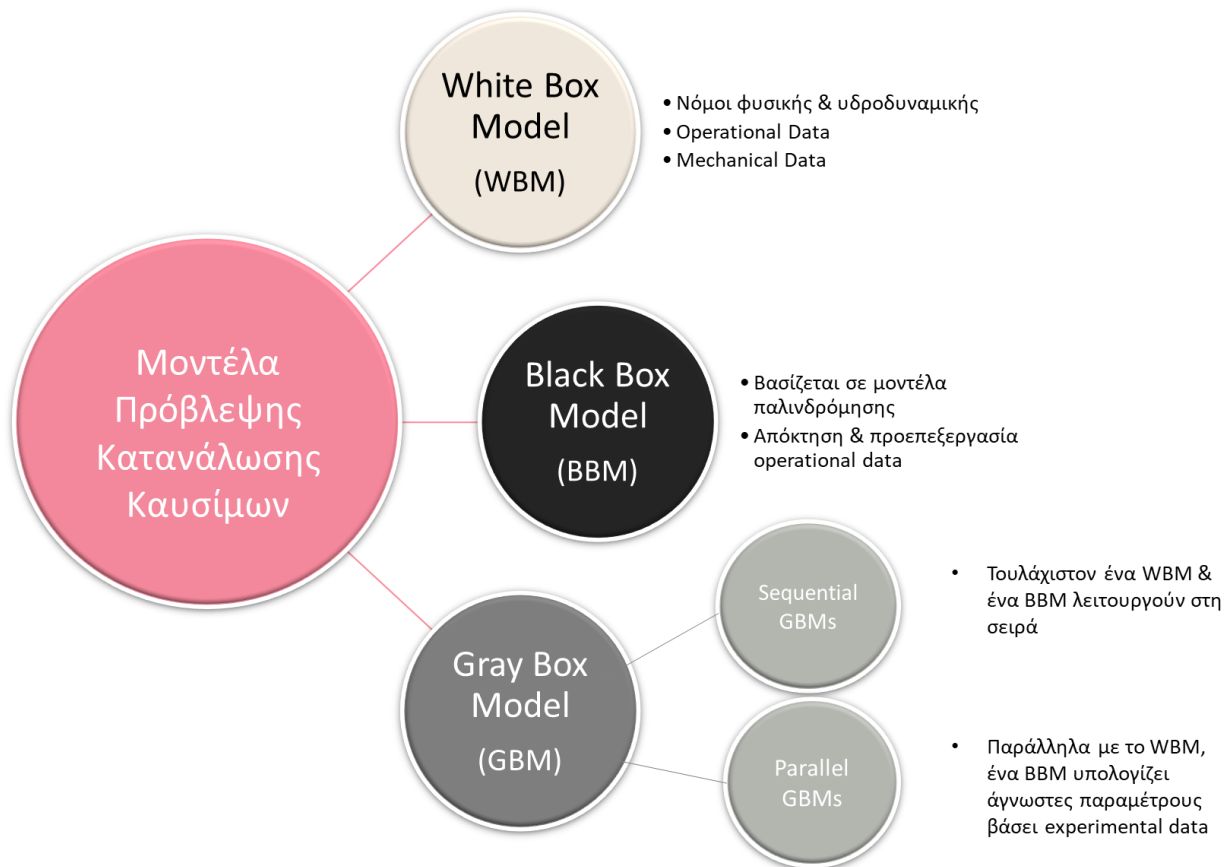
Εικόνα 6: Τύπος και Τεχνικές Μηχανικής Μάθησης

4. Διαχείριση Κατανάλωσης Καυσίμων & Ανάλυση Δεδομένων

4.1 Μοντέλα Πρόβλεψης Κατανάλωσης καυσίμων

Μία επιχείρηση, ανεξαρτήτου είδους, εκτός από τη συνεχή της εξέλιξη και την οικονομική άνοδό της, στοχεύει κυρίως στην ελαχιστοποίηση του κόστους των διεργασιών της. Στον κλάδο της ναυσιπλοΐας, οι κατασκευαστικές εταιρείες έχουν σημειώσει αλματώδη πρόοδο χάρη στην εφαρμογή του Dynamic Positioning και στη συνεχή βελτίωση αυτού. Η ελαχιστοποίηση των δαπανών στον τομέα της ναυτιλίας, όμως, είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την κατανάλωση καυσίμων των πλοίων που κατασκευάζονται, εφόσον η κίνησή τους δεν μπορεί να επιτευχθεί με διαφορετικό τρόπο. Η προαναφερθείσα συνθήκη αποτελεί κώλυμα για τις κατασκευαστικές εταιρείες, εφόσον η τιμή του πετρελαίου δεν είναι σταθερή κατά την περίοδο συγγραφής της παρούσας εργασίας. Επομένως, προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο στόχος της ελάχιστης δυνατής δαπάνης, είναι αναγκαία η σωστή διαχείριση των καυσίμων εν ώρα πλεύσης.

Η ανάγκη για την αποτελεσματική κατανάλωση καυσίμων των πλοίων, η χρήση των δεδομένων των Dynamic Positioning συστημάτων καθώς και η αξιοποίηση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης συντέλεσαν στην ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης κατανάλωσης καυσίμων, τα οποία παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.



Εικόνα 7: Μοντέλα Πρόβλεψης Κατανάλωσης Καυσίμων

Τα μοντέλα πρόβλεψης κατανάλωσης καυσίμων χωρίζονται σε τρεις (3) κατηγορίες, τα White Box Models (WBM), τα Black Box Models (BBM) και τα Gray Box Models (GBM). [18] Τα WBM, αρχικά, υπολογίζουν τις αντιστάσεις που συναντά ένα πλοίο από διαφορετικές πηγές με βάση τις αρχές της φυσικής και τους νόμους της υδροδυναμικής. Βασίζεται σε δεδομένα λειτουργίας του πλοίου (operational data) και σε μηχανικά δεδομένα (mechanical data), ενώ κάποια μοντέλα αυτού τους είδους χρησιμοποιούν, επίσης, δεδομένα θάλασσας και καιρού. Τα WBM, όμως, δε λαμβάνουν υπόψη τα δεδομένα συντήρησης του πλοίου (maintenance data).

Η επόμενη κατηγορία, αυτή των BBMs, στηρίζεται σε μοντέλα παλινδρόμησης. Πρώτο βήμα της εφαρμογής του μοντέλου αποτελεί η απόκτηση χαρακτηριστικών/δεδομένων (feature/data acquisition) και η προεπεξεργασία (preprocessing) αυτών. Στη συνέχεια, βάσει λογικών υποθέσεων, σχετικών με τις ανάγκες του εκάστοτε σκάφους, επιλέγονται τα κατάλληλα μοντέλα παλινδρόμησης. Έπειτα, οι παράμετροι του μοντέλου εκτιμώνται χρησιμοποιώντας πραγματικά ή προσομοιωμένα δεδομένα λειτουργίας του πλοίου (estimated or simulated operational data) και, τέλος, πραγματοποιείται η προσαρμογή του μοντέλου (model fit). Ειδικότερα, τα BBMs βασίζονται σε στατιστικά μοντέλα στοχεύοντας κυρίως στον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ κατανάλωσης καυσίμου και ταχύτητας πλεύσης, καθώς πλήθος ερευνητών και επαγγελματιών του κλάδου υποστηρίζουν πως η ταχύτητα πλεύσης του πλοίου είναι ο πλέον καθοριστικός παράγοντας της κατανάλωσης καυσίμου. [18]

Τα GBMs αποτελούν την τελευταία κατηγορία μοντέλων πρόβλεψης κατανάλωσης καυσίμων και χωρίζονται σε δύο (2) υποκατηγορίες, τα Sequential GBMs και τα Parallel GBMs. Στα Sequential GBMs, αναπτύσσονται δύο ή περισσότερα μοντέλα σε μια σειρά, συμπεριλαμβανομένων τουλάχιστον ενός WBM και ενός BBM τα οποία συνδυάζονται για το σχηματισμό ενός ενιαίου GBM. Πιο αναλυτικά, ένα BBM αναπτύσσεται για την επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων (raw data) και τα αρχικά αποτελέσματα πρόβλεψης τροφοδοτούνται στη συνέχεια σε ένα WBM. Στα Parallel GBMs ένα WBM λειτουργεί, αρχικά, λαμβάνοντας υπόψη τις αρχές και τους νόμους φυσικής και υδροδυναμικής των πλοίων και, παράλληλα, οι άγνωστες παράμετροι εκτιμώνται από τα BBMs βάσει πειραματικών δεδομένων (experimental data). Κατά την περίοδο συγγραφής της παρούσας εργασίας, υπάρχουν λίγα GBMs για την πρόβλεψη κατανάλωσης καυσίμου των πλοίων. [18]

4.2 Ανάλυση Δεδομένων για την Κατανάλωση Καυσίμων

Η ταχύτητα πλεύσης θεωρείται προσδιοριστικός παράγοντας της κατανάλωσης καυσίμων, όμως η ίδια η ταχύτητα αποτελεί απόρροια διαφόρων συντελεστών. Ειδικότερα, η ενεργειακή απόδοση μιας πλωτής κατασκευής εξαρτάται κυρίως από την αντίσταση και το σύστημα προώθησης αυτής, η αποτελεσματικότητα των οποίων μπορεί να διαφέρει από πλοίο σε πλοίο. Αυτή η διαφορά απόδοσης προκύπτει διότι, αρχικά, δεν έχουν όλα τα πλοία την ίδια μηχανή και, δεύτερον, γιατί η αντίσταση κάθε πλοίου επηρεάζεται από το βάθος της θάλασσας και τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Τα απαιτούμενα δεδομένα πλεύσης λαμβάνονται από τους αντίστοιχους αισθητήρες (αισθητήρες καιρικών συνθηκών και θέσης) του πλοίου σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια της πορείας του σκάφους. Σε αυτό το σημείο τίθεται το ερώτημα για το πώς μπορούν να αξιοποιηθούν και να αναλυθούν τα δεδομένα αυτά, έτσι ώστε να προσφέρουν την απαιτούμενη πληροφορία για την διαχείριση της κατανάλωσης των καυσίμων. Δεδομένης της αλματώδους τεχνολογικής εξέλιξης που παρατηρείται ευρέως, ο κλάδος της ναυσιπλοΐας έχει ξεκινήσει την εφαρμογή διαφόρων αλγορίθμων μηχανικής μάθησης με στόχο την γρηγορότερη και ακριβέστερη πρόβλεψη κατανάλωσης καυσίμων.

Η πρώτη -ενδεικτική- τεχνική ανάλυσης δεδομένων είναι η Πολλαπλή Γραμμική Παλινδρόμηση (Multiple Linear Regression – MLR). Η χρήση μοντέλων παλινδρόμησης, γενικά, χρησιμοποιείται στη στατιστική για την πρόβλεψη της σχέσης μεταξύ διαφορετικών μεταβλητών. Η MLR, ειδικότερα, αποσκοπεί στην ανάλυση της σχέσης πολλών ανεξάρτητων (independent) ή προγνωστικών (predictor) μεταβλητών με μία εξαρτημένη (dependent) μεταβλητή. [19] Η καταλληλότητα της MLR ελέγχθηκε όταν εφαρμόστηκε σε ρυμουλκά πλοία σε καταστάσεις φόρτωσης (laden) και ερμάτωσης⁹ (ballasting) στον Πορθμό της Μαλάκκα (Malacca), για την εκτίμηση της κατανάλωσης καυσίμων τους. Κύριο μέλημα της έρευνας αυτής ήταν η υλοποίηση ενός MLR μοντέλου το οποίο θα προέβλεπε την προτεινόμενη και αποτελεσματικότερη ταχύτητα του σκάφους, ούτως ώστε να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση της καταναλωμένης ποσότητας καυσίμου. Αναλυτικότερα, για την πρόβλεψη χρησιμοποιήθηκαν η απόσταση που διανύθηκε, οι ώρες πλεύσης, η τρέχουσα ταχύτητα του πλοίου, η χωρητικότητα εκτοπίσματος του σκάφους¹⁰ (ship deadweight tonnage) και η ταχύτητα του αέρα. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε πέτυχε R^2 score¹¹ ίσο με 0.92, αποδεικνύοντας ότι οι προαναφερθείσες μεταβλητές επηρεάζουν σημαντικά την κατανάλωση καυσίμων στα πλοία. [23]

Η δεύτερη και τελευταία ενδεικτική μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ίδιο σκοπό απαντάται στο μοντέλο Long Short-Term Memory (LSTM). Ένα μοντέλο Long Short-Term

⁹ Ερμάτωση (ballasting): η διαδικασία επίτευξης επαρκούς ευστάθειας ενός πλοίου με τη χρήση -συνήθως- θαλασσινού νερού σε κατάλληλες δεξαμενές, όταν αυτό δεν είναι πλήρως φορτωμένο. [20]

¹⁰ Χωρητικότητα εκτοπίσματος σκάφους (ship deadweight tonnage): Η μέτρηση του συνολικού βάρους/χωρητικότητας ενός πλοίου. Περιλαμβάνει το φορτίο, τα καύσιμα, το πλήρωμα, τους επιβάτες, τα τρόφιμα, και το νερό, αλλά όχι το νερό του λέβητα. [21]

¹¹ R^2 score: εξετάζει το αν μια εξαρτημένη μεταβλητή συσχετίζεται ή μπορεί να προβλεφθεί από τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Λαμβάνει τιμές από 0 (καμία συσχέτιση) έως 1 (πλήρης συσχέτιση). [22]

Memory αξιοποιείται για την ταξινόμηση, την επεξεργασία και την πραγματοποίηση προβλέψεων πάνω σε δεδομένα χρονοσειρών (time-series data) στα οποία παρατηρούνται καθυστερήσεις (lags) άγνωστης διάρκειας μεταξύ των γεγονότων μίας χρονοσειράς, καθώς είναι ικανό να αντικαταστήσει τυχόν ελλιπείς τιμές. Το μοντέλο LSTM είναι αποτελεσματικό όταν οι παλαιότερες τιμές των μεταβλητών ενδιαφέροντος επηρεάζουν σημαντικά τις τρέχουσες τιμές τους. [24] Σε έρευνα καταλληλότητας του μοντέλου LSTM όπου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα κατανάλωσης καυσίμων ρυμουλκών διάρκειας τεσσάρων (4) μηνών, αποδείχθηκε ότι το μοντέλο αυτό είναι αποτελεσματικότερο και γρηγορότερο, σημειώνοντας R² score ίσο με 0.94. Σε αυτό το σημείο αξίζει να τονιστεί πως η ακρίβεια του μοντέλου LSTM μειώνεται όταν αξιοποιούνται δεδομένα μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας. [23] Οι παραπάνω τεχνικές συνοψίζονται στον ακόλουθο Πίνακας 4.

	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Πολλαπλή Γραμμική Παλινδρόμηση (MLR)	Απλή εφαρμογή	Τυχόν ακραίες τιμές (outliers) επηρεάζουν σημαντικά την πρόβλεψη
Μοντέλο Long Short-Term Memory (LSTM)	Αποτελεσματικό ακόμη και με ελλιπείς τιμές	Υψηλότερο υπολογιστικό κόστος

Πίνακας 4: Σύγκριση MLR και LSTM

Η αποτελεσματική κατανάλωση καυσίμων των πλοίων, λοιπόν, αποτελεί καίριο ζήτημα για τους απασχολούμενους του κλάδου. Η ραγδαία ανάπτυξη του τομέα της μηχανικής μάθησης καθιστά εφικτή τη χρήση τεχνικών, όπως αυτή της Πολλαπλής Γραμμικής Παλινδρόμησης και του μοντέλου Long Short-Term Memory, για την πρόβλεψη και εύρεση της αποδοτικής κατανάλωσης καυσίμων. Στο στόχο αυτό επιχειρεί να συμβάλει και η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία.


5. Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα (Offshore Wind Farms)

Τα υπεράκτια ή θαλάσσια αιολικά πάρκα (offshore wind farms/OWF) είναι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος στους οποίους εμπεριέχονται όλες οι απαιτούμενες εγκαταστάσεις άντλησης, μετατροπής και παροχής αιολικής ενέργειας. Ένα θαλάσσιο αιολικό πάρκο αποτελείται από τις ανεμογεννήτριες, οι οποίες παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα, τα καλώδια από όπου μεταφέρεται το ρεύμα και από έναν υπεράκτιο υποσταθμό (substation) μέσω του οποίου παρέχεται το παραγόμενο ρεύμα στο κύριο δίκτυο της ακτής. [43]

Το πρώτο εγχείρημα ανέγερσης ενός τέτοιου αιολικού πάρκου έλαβε χώρα το 1991 στη Δανία. Το θαλάσσιο αιολικό πάρκο 'Vindeby' (Vindeby Offshore Wind Farm) χτίστηκε κοντά στη βορειοδυτική ακτή του νησιού Lolland, και απαρτιζόταν από έντεκα (11) ανεμογεννήτριες, στοιχισμένες σε δύο σειρές. [44] Μέχρι τη διακοπή της λειτουργίας του το 2017 λόγω υψηλού κόστους λειτουργίας, παρήγαγε 5MW¹² ετησίως και ηλεκτροδοτούσε 2200 σπίτια στη Δανία κάθε χρόνο. [45]

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται συνεχής ανέγερση υπεράκτιων αιολικών πάρκων κυρίως στην Ευρώπη, έπειτα στην Ασία (Κίνα, Ιαπωνία, Νότια Κορέα, Ταιβάν, Βιετνάμ) και στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Το 2020, εκτός από τα 112 υπεράκτια αιολικά πάρκα που λειτουργούσαν μέχρι τότε, επιπλέον 712 έργα βρίσκονταν σε διαφορετικά στάδια ανάπτυξης (development). [47] Στην Ευρώπη, μέχρι το τέλος του Ιουνίου 2022, στο Ηνωμένο Βασίλειο -το οποίο κατέχει τα πρωτεία στην ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων- ήταν συνδεδεμένα στο κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησής του 44 θαλάσσια αιολικά πάρκα, τα οποία αντιστοιχούσαν σε 2542 ανεμογεννήτριες και παραγωγή 12739 MW. Ακολουθεί η Γερμανία, με 29 θαλάσσια αιολικά πάρκα, 1501 ανεμογεννήτριες και παραγωγή 7713 MW. Κατά τη περίοδο καταγραφής της εργασίας, η Ελλάδα δε διαθέτει υπεράκτια αιολικά πάρκα. Μέχρι το καλοκαίρι 2022 η Ευρώπη διέθετε συνολικά 123 πλήρως λειτουργικά θαλάσσια αιολικά πάρκα, με 5795 ανεμογεννήτριες και παρήγαγε ενέργεια 28363 MW. [48] Στον Πίνακα 5 καταγράφονται όλες οι Ευρωπαϊκές χώρες που έχουν συνδέσει υπεράκτια αιολικά πάρκα στο κεντρικό τους δίκτυο ηλεκτροδότησης. Επίσης, παρουσιάζεται ο αριθμός των ανεμογεννητριών των προαναφερθέντων πάρκων καθώς και τα Μεγαβάτ που αντιστοιχούν στην ενέργεια που παράγουν. [48]

¹² MW: Megawatt(s) / Μεγαβάτ. Μονάδα μέτρησης ηλεκτρικής ισχύος. 1MW = 1.000.000 Watt [46]



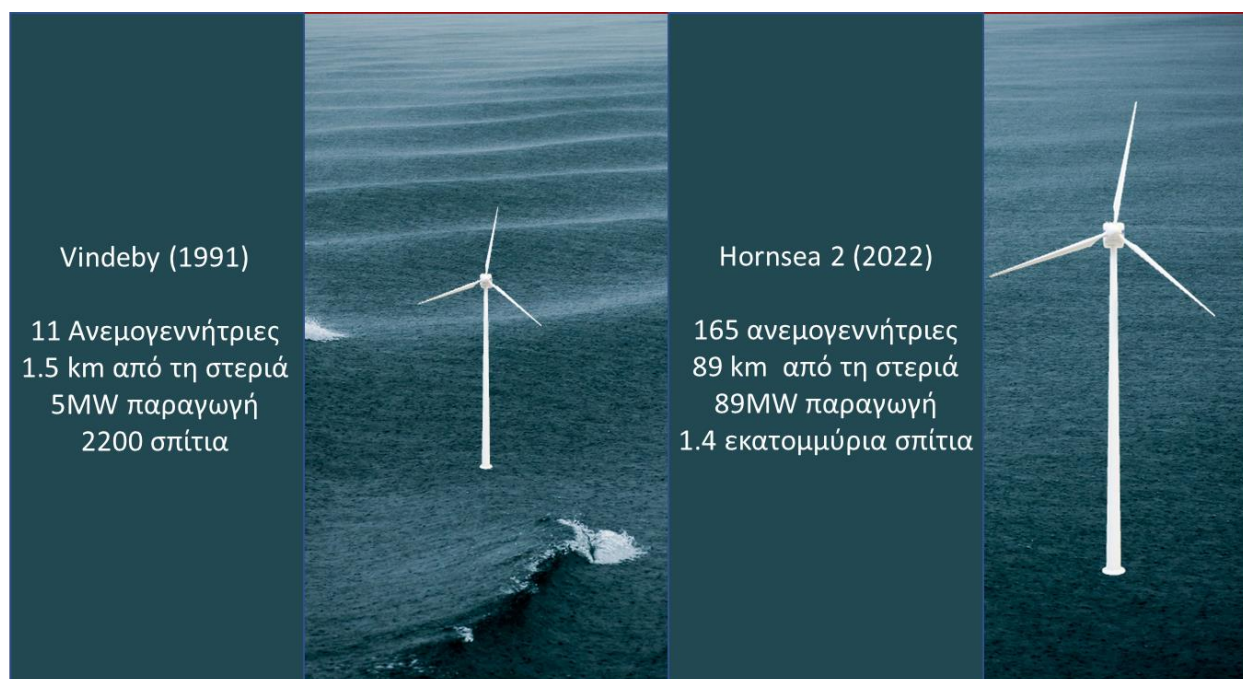
	Συνδεδεμένα OWF	Συνδεδεμένες Ανεμογεννήτριες OWF	Παραγόμενη Ενέργεια (MW)
Ηνωμένο Βασίλειο	44	2542	12739
Γερμανία	29	1501	7713
Ολλανδία	9	599	2986
Δανία	15	631	2308
Βέλγιο	11	399	2261
Σουηδία	5	80	192
Φινλανδία	3	19	71
Ιταλία	1	10	30
Ιρλανδία	1	7	25
Πορτογαλία	1	3	25
Νορβηγία	2	2	6
Ισπανία	1	1	5
Γαλλία	1	1	2
Σύνολο	123	5795	28363

Πίνακας 5: Συνδεδεμένα υπεράκτια αιολικά πάρκα στην Ευρώπη μέχρι τον Ιούνιο 2022

Η ανέγερση των θαλάσσιων αιολικών πάρκων, ιδίως στην Ευρώπη, εξελίσσεται ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες. Η εξέλιξη αυτή είναι απόρροια της νέας περιβαλλοντικής πολιτικής που έχει υιοθετήσει η Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.) τα τελευταία χρόνια, αλλά και λόγω του χαμηλότερου κόστους παραγωγής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (renewable energy) σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα (fossil fuels). Ειδικότερα, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει δεσμευτεί να μειώσει τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου τουλάχιστον κατά 55% -συγκριτικά με τα επίπεδα του 1990- μέχρι το 2030 [49]. Συναρτήσει του παραπάνω στόχου, προβλέπεται ότι θα πρέπει οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να καταλαμβάνουν το 40% της συνολικής παραγωγής ενέργειας της Ε.Ε. [50]. Σύμφωνα με μοντέλα πρόβλεψης, προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι αυτοί πρέπει να παραχθούν τουλάχιστον 79 GW¹³ ηλεκτρικού ρεύματος από υπεράκτια αιολικά πάρκα, αλλά κάποιες κυβερνήσεις έχουν δεσμευτεί για περισσότερα. Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει η ανέγερση και η λειτουργία των ευρωπαϊκών υπεράκτιων αιολικών πάρκων να αυξηθεί και να συνεχιστεί για το διάστημα 2022-2030. [51] Παράλληλα με την περιβαλλοντική συνείδηση που έχει αποκτήσει η Ε.Ε. τον τελευταίο καιρό, η αύξηση των θαλάσσιων αιολικών πάρκων οφείλεται και στο χαμηλό κόστος ανέγερσής τους. Σύμφωνα με το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ τα αιολικά και ηλιακά πάρκα, γενικώς, είναι πιο ανταγωνιστικά οικονομικά σε σχέση με τις εγκαταστάσεις αερίου, γεωθερμίας, άνθρακα ή πυρηνικών εγκαταστάσεων. [53]

¹³ GW: Gigawatt(s) / Γιγαβάτ. Μονάδα μέτρησης ηλεκτρικής ισχύος. 1GW = 10⁹ Watt [52]

Βέβαια, παρά το γεγονός ότι η παραγωγή αιολικής ενέργειας είναι φθηνότερη από τους κλασικούς τρόπους παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, δε σημαίνει ότι η ανέγερση θαλάσσιων αιολικών πάρκων συνάδει με μηδαμινά κόστη κατασκευής. Σαφώς, το κόστος κατασκευής ενός τέτοιου πάρκου εξαρτάται από τον αριθμό των ανεμογεννητριών που το στελεχώνουν, τον τύπο των ανεμογεννητριών, το κόστος εισαγωγής των εξαρτημάτων αυτών κ.ο.κ. αλλά, ένας από τους κύριους προσδιοριστικούς παράγοντες του κόστους κατασκευής ενός υπερράκτιου αιολικού πάρκου, είναι η απόσταση των ανεμογεννητριών από την ακτή. Παλαιότερα, όταν η κατασκευή των πάρκων βρισκόταν σε πρώιμο στάδιο, αυτά τοποθετούνταν σχετικά κοντά στην ακτή για λόγους ευκολίας κατασκευής, συντήρησης και ενσωμάτωσής τους στο κεντρικό δίκτυο της ακτής. Όμως, καθώς αυξανόταν ο αριθμός και το μέγεθος των θαλάσσιων αιολικών πάρκων παγκοσμίως, τόσο περιοριζόταν και ο διαθέσιμος χώρος κοντά στις ακτές. Για παράδειγμα, το πρώτο θαλάσσιο αιολικό πάρκο, όπως αναφέρεται παραπάνω, διέθετε 11 ανεμογεννήτριες και απείχε 1.5 χιλιόμετρα από τη στεριά [44] . Το πιο πρόσφατο υπερράκτιο αιολικό πάρκο που λειτουργεί από το καλοκαίρι του 2022 το οποίο ονομάζεται 'Hornsea 2', απαρτίζεται από 165 ανεμογεννήτριες, ηλεκτροδοτεί περίπου 1.4 εκατομμύρια σπίτια και βρίσκεται 89 χιλιόμετρα μακριά από τη στεριά (Εικόνα 8). [54] Είναι εμφανής η ραγδαία εξέλιξη και επέκταση των θαλάσσιων αιολικών πάρκων, αν ληφθεί υπόψη ότι, μέχρι το 2020, τα υπερράκτια αιολικά πάρκα απείχαν παγκοσμίως κατά μέσο όρο 18.8 χιλιόμετρα από την ακτή. [47]



Εικόνα 8: Σύγκριση των υπερράκτιων αιολικών πάρκων Vindeby (1991) & Hornsea 2 (2022)

Η κατασκευή των υπεράκτιων αιολικών πάρκων δεν είναι το μόνο δαπανηρό σκέλος αυτής της επένδυσης * είναι δαπανηρή και η συντήρησή τους. Για παράδειγμα, η συντήρηση μιας ανεμογεννήτριας ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου στο Ηνωμένο Βασίλειο μπορεί να κοστίζει μέχρι και £250000 (€291643). [55] Ένα μέρος του κόστους συντήρησης αφορά τον τρόπο κατά τον οποίο πραγματοποιείται αυτή, ο οποίος καθιστά πολλές φορές αναγκαία την χρήση ειδικών πλοίων. Πιο συγκεκριμένα, ένα μεγάλο κομμάτι του κόστους συντήρησης αφορά την κατανάλωση των καυσίμων που χρησιμοποιούν τα πλοία για να μετακινήσουν είτε προσωπικό, είτε εξαρτήματα από σημείο σε σημείο ούτως ώστε να διασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία των υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Το παραπάνω πρόβλημα αναδεικνύει την ανάγκη για την αποτελεσματική δρομολόγηση αυτών των πλοίων, ούτως ώστε να επιτευχθεί αποδοτική κατανάλωση καυσίμων και ταυτόχρονα μείωση του κόστους συντήρησης. Προς αυτή την κατεύθυνση, η παρούσα διπλωματική εργασία προτείνει έναν αλγόριθμο δρομολόγησης πλοίων συντήρησης θαλάσσιων αιολικών πάρκων.

6. Προτεινόμενη Προσέγγιση

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την υλοποίηση ενός πιθανού αλγόριθμου αποτελεσματικής -ως προς την κατανάλωση καυσίμου- δρομολόγησης πλοίων συντήρησης θαλάσσιων πάρκων ανεμογεννητριών, χρησιμοποιώντας δεδομένα θέσης και καιρού όμοια με αυτά που μπορεί να συλλέγονται από ένα σύστημα Δυναμικής Τοποθέτησης (Dynamic Positioning). Πιο συγκεκριμένα, η εκπόνηση του προαναφερθέντος αλγόριθμου διαχωρίζεται στα ακόλουθα μέρη: τη συλλογή, την προεπεξεργασία και την ανάλυση των δεδομένων, καθώς και την υλοποίηση της προτεινόμενης προσέγγισης.

6.1. Συλλογή Δεδομένων

Το πρώτο στάδιο της παρούσας εργασίας αφορά τη συλλογή των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση του αλγόριθμου. Ειδικότερα, τα επιλεγθέντα δεδομένα απαντώνται στο 'Piraeus AIS dataset for large-scale maritime data analytics', ένα σύνολο δεδομένων το οποίο περιέχει πληροφορίες για τη θέση διάφορων πλοίων, καθώς και δεδομένα καιρού της ευρύτερης περιοχής του λιμανιού του Πειραιά και του Σαρωνικού γενικότερα. Αναλυτικότερα, το προαναφερθέν σύνολο δεδομένων καλύπτει διάστημα δυόμιση περίπου ετών, από τις 9 Μαΐου του 2017 έως και τις 26 Δεκεμβρίου του 2019. [25] Για την εκπόνηση της εργασίας χρησιμοποιούνται τα δεδομένα του έτους 2019.

Τα δεδομένα θέσης των πλοίων, αρχικά, περιλαμβάνουν πληροφορίες για τη θέση και την πορεία αυτών. Στα ανακτηθέντα δεδομένα επισημαίνεται η ώρα και η ημερομηνία λήψης των δεδομένων (timestamp_) σε μορφή UNIX¹⁴. Έπειτα, εμπεριέχεται ο κωδικός του εκάστοτε σκάφους (vessel_id) ο οποίος, όμως, είναι τεχνητός για λόγους ανωνυμότητας του στόλου της εκάστοτε εταιρίας¹⁵. Σε αυτό το σημείο αξίζει να τονιστεί πως η λήψη των δεδομένων πραγματοποιείται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Επιπλέον, συμπεριλαμβάνεται το γεωγραφικό μήκος (lon) και το γεωγραφικό πλάτος (lat) της θέσης του σκάφους σε γωνιακές μονάδες (σε μορφή WGS-84¹⁶). Παράλληλα, σε αυτό το σύνολο δεδομένων περιλαμβάνεται η ταχύτητα (speed) του πλοίου σε κόμβους, η κατεύθυνσή (heading) του σε σχέση με τον πραγματικό βορά σε μοίρες και, τέλος, η πορεία του σκάφους πάνω από το έδαφος σε μοίρες (course / course over ground). Οι μεταβλητές αυτές συνοψίζονται στον Πίνακα 6.

¹⁴ UNIX Time: απεικόνιση ώρας και ημερομηνίας σε μη δίσεκτα (non-leap) δευτερόλεπτα, ξεκινώντας από την 1^η Ιανουαρίου 1970, στις 00:00 UTC. [26]

¹⁵ Υπάρχει περίπτωση οι εταιρείες που έχουν στην κατοχή τους τα περιλαμβανόμενα πλοία να έχουν θέσει ως όρο για την παραχώρηση των δεδομένων την πλήρη ανωνυμοποίηση των στοιχείων του στόλου τους.

¹⁶ World Geodetic System 1984 (WGS-84): ένα παγκόσμιο πλαίσιο αναφοράς που χρησιμοποιείται για τη συλλογή και την αναπαράσταση σχεδόν όλων των σύγχρονων γεωχωρικών δεδομένων (geospatial data). [27]

Μεταβλητές Δεδομένων Πλοίων	
Όνομα	Περιγραφή
timestamp_	Ημερομηνία λήψης δεδομένων
vessel_id	Κωδικός πλοίου
lon	Γεωγραφικό μήκος
lat	Γεωγραφικό πλάτος
speed	Ταχύτητα πλοίου
heading	Κατεύθυνση πλοίου
course	Πορεία πλοίου

Πίνακας 6: Μεταβλητές Δεδομένων Πλοίων

Οι πληροφορίες θέσης των σκαφών συνοδεύονται από δεδομένα καιρού τα οποία επίσης συλλέγονται σε τακτές περιόδους. Η πρώτη πληροφορία που καταγράφεται είναι η ώρα και η ημερομηνία λήψης των δεδομένων, σε κλασική (timestamp) και UNIX μορφή (timestamp_). Έπειτα, αποθηκεύονται το γεωγραφικό μήκος (lon) και πλάτος (lat) από όπου λαμβάνονται τα δεδομένα, η μέγιστη (tmax) και η ελάχιστη (tmin) θερμοκρασία της θάλασσας ανά τρίωρο, καθώς και η θερμοκρασία της θάλασσας σε βαθμούς Κέλβιν (tmp) κατά την στιγμή της λήψης. Παράλληλα, γίνεται καταμέτρηση της πίεσης της μέσης στάθμης της θάλασσας (prmsl – Pressure at Mean Sea Level), της σχετικής υγρασίας (rh – Relative Humidity), της ταχύτητας ριπής του ανέμου (gust), της ορατότητας (vis) και της θερμοκρασίας σημείου δρόσου (dpt – Dewpoint Temperature¹⁷). Επιπλέον, αποθηκεύεται η συνολική βροχόπτωση ανά τρεις (3) ώρες (arcp). Τέλος, σημειώνονται η ταχύτητα του αέρα (wsrd), καθώς και η κατεύθυνσή του στον κατακόρυφο/κάθετο άξονα (ugrd - uComponent), στον οριζόντιο άξονα (vgrd - vComponent), σε μαθηματικό (wdirmat) και μετεωρολογικό μοντέλο (wdirmet). [25] Οι παραπάνω μεταβλητές συνοψίζονται στον Πίνακας 7.

¹⁷ Θερμοκρασία Σημείου Δρόσου (Dew Point Temperature): η θερμοκρασία στην οποία πρέπει να ψυχθεί ο αέρας (σε σταθερή πίεση) προκειμένου να επιτευχθεί σχετική υγρασία (RH) 100%. [28]

Μεταβλητές Δεδομένων Καιρού	
Όνομα	Περιγραφή
timestamp	Ώρα και ημερομηνία λήψης των δεδομένων
timestamp_	Ώρα και ημερομηνία λήψης των δεδομένων – μορφή UNIX
lon	Γεωγραφικό μήκος
lat	Γεωγραφικό πλάτος
tmax	Μέγιστη θερμοκρασία της θάλασσας ανά τρίωρο
tmin	Ελάχιστη θερμοκρασία της θάλασσας ανά τρίωρο
tmp	Θερμοκρασία της θάλασσας κατά τη λήψη
prmsl	Πίεση της μέσης στάθμης της θάλασσας
rh	Σχετική υγρασία
gust	Ταχύτητα ριπής του ανέμου
vis	Ορατότητα
dpt	Θερμοκρασία σημείου δρόσου
arcp	Συνολική βροχόπτωση ανά τρεις (3) ώρες
wspd	Ταχύτητα αέρα
ugrd	Κατεύθυνση του αέρα στον κατακόρυφο/κάθετο άξονα
vgrd	Κατεύθυνση του αέρα στον οριζόντιο άξονα
wdirmat	Κατεύθυνση του αέρα σε μαθηματικό μοντέλο
wdirmet	Κατεύθυνση του αέρα σε μετεωρολογικό μοντέλο

Πίνακας 7: Μεταβλητές Δεδομένων Καιρού

6.2. Προεπεξεργασία Δεδομένων

6.2.1. MongoDB

Η συλλογή των δεδομένων ακολουθείται από την προεπεξεργασία τους. Η προεπεξεργασία των δεδομένων (data preprocessing) αναφέρεται στη διαχείριση και την απόρριψη των δεδομένων ενός συνόλου (dataset) τα οποία, χωρίς αυτή, θα επηρέαζαν την απόδοση και την ακρίβεια του αλγόριθμου για τον οποίο προορίζονται. Για την εκπόνηση της εργασίας δεν ήταν αναγκαία η χρήση ολόκληρου του προαναφερθέντος συνόλου δεδομένων. Τα επιλεγθέντα δεδομένα και η προεπεξεργασία αυτών περιγράφονται σε αυτή την ενότητα.

Αρχικά, για το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, επιλέχθηκαν τα δεδομένα του έτους 2019, τα οποία εισήχθησαν στο πρόγραμμα διαχείρισης βάσεων δεδομένων MongoDB για την καλύτερη δυνατή διαχείρισή τους. Το πρόγραμμα MongoDB είναι document-based, που σημαίνει ότι αποθηκεύει και απεικονίζει τα δεδομένα με τη μορφή BSON εγγράφων (BSON documents), τα οποία αποτελούν δυαδική αναπαράσταση JSON αρχείων. [29]

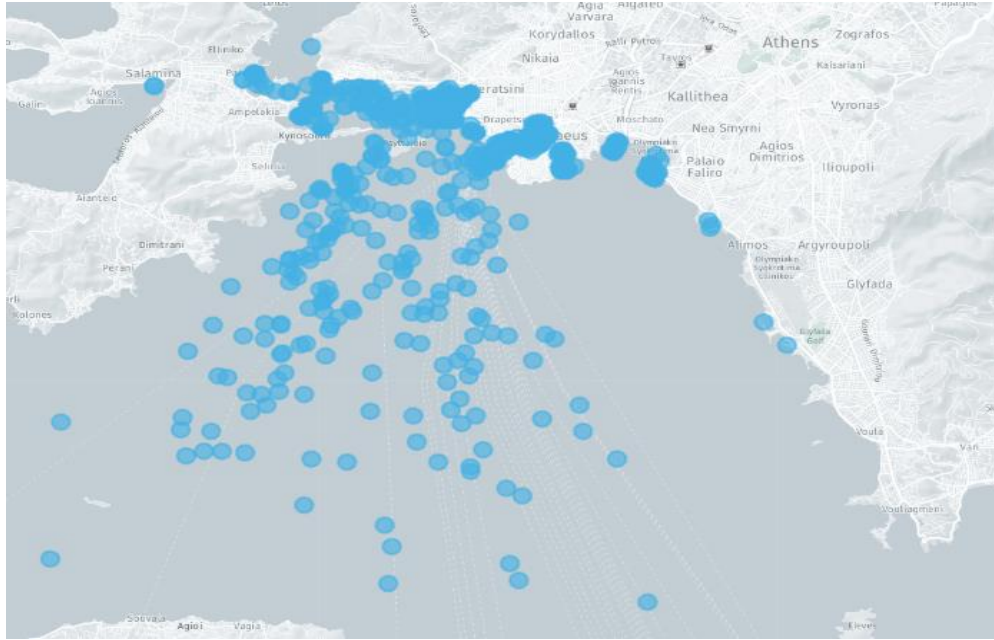
```
_id: ObjectId('63209844f1d2714b5f3a13c3')
timestamp: Timestamp({ t: 360, i: -1781652856 })
vessel_id: "29b2c240d3ee158281fb4ad556939ee938d08685bd796a6877cbecd49a5655c4"
lon: 23.6150583333333
lat: 37.94470833333296
heading: 0
speed: 0
course: 221.3
> location: Object
```

Εικόνα 9: Παράδειγμα ενός document της συλλογής 'Vessels'

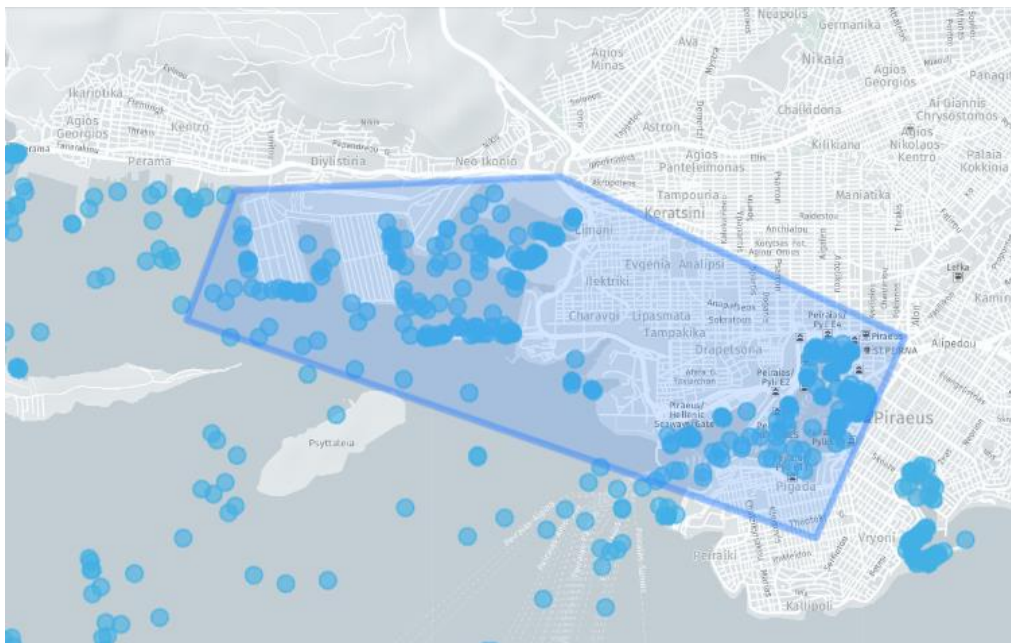
Για την επεξεργασία των επιλεγθέντων δεδομένων, δημιουργήθηκε η μη σχεσιακή βάση δεδομένων 'liman' μέσα στην οποία αποθηκεύτηκαν τα δεδομένα πλοίων -ένα από τα οποία αναπαρίσταται ενδεικτικά στην Εικόνα 9- και καιρού, στις συλλογές (collections) 'vessels' και 'weather' αντίστοιχα. Το σύνολο των δεδομένων της εκάστοτε συλλογής ανήλθε στις 92.5 εκατομμύρια και 131.4 χιλιάδες εγγραφές αντίστοιχα.

Την εισαγωγή των δεδομένων ακολούθησε η περεταίρω επεξεργασία τους. Αρχικά, και στις δύο συλλογές, οι μεταβλητές γεωγραφικού μήκους και πλάτους, 'lon' και 'lat' αντίστοιχα, συμπύχθηκαν σε μία μεταβλητή, αυτή των συντεταγμένων (coordinates), για την γεωγραφική απεικόνιση των πλοίων και των αισθητήρων καιρού αντίστοιχα. Τα πλοία βρισκονταν μεν, στην ευρύτερη περιοχή του Σαρωνικού αλλά, εντονότερη δραστηριότητα παρατηρήθηκε στο ευρύτερο λιμάνι του Πειραιά, όπως φαίνεται στις εικόνες 10 και 11. Τα δεδομένα καιρού παρουσιάζονται σε ένα πλέγμα 9X5 το οποίο εκτείνεται σε όλο το Σαρωνικό (Εικόνα 12).

Ιωάννα Κανδή

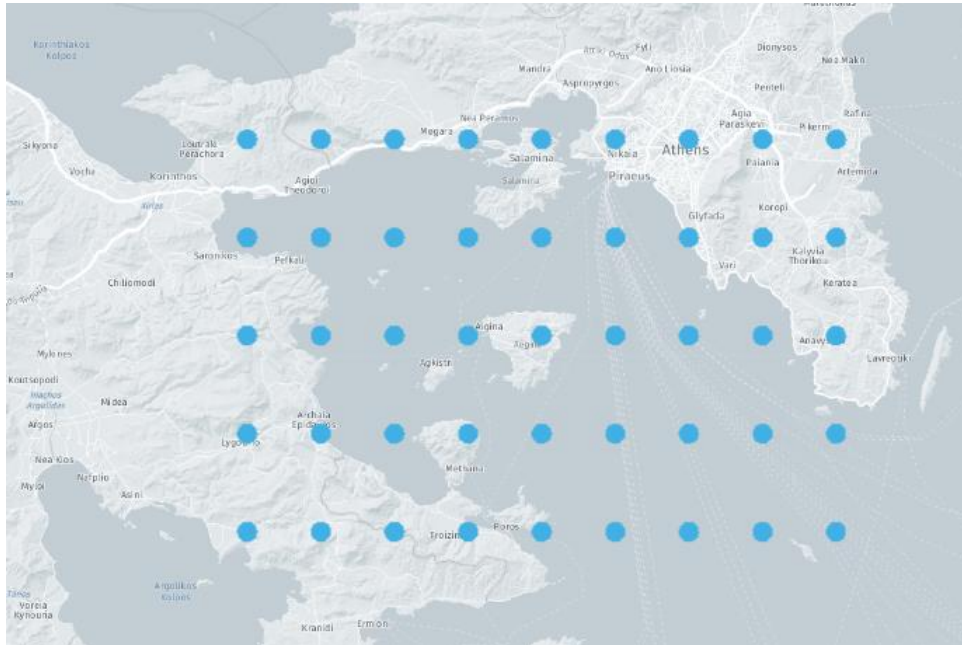


Εικόνα 10: Απεικόνιση Συντεταγμένων Πλοίων της Συλλογής 'Vessels' (Σαρωνικός)



Εικόνα 11: Απεικόνιση Συντεταγμένων Πλοίων της Συλλογής 'Vessels' (Ευρύτερο Λιμάνι Πειραιά)

Αλγόριθμος Δρομολόγησης Πλοίων Διεργασιών Υπεράκτιου Αιολικού Πάρκου για τη Διαχείριση Καυσίμων



Εικόνα 12: Απεικόνιση Συντεταγμένων Λήψης Δεδομένων Καιρού της Συλλογής 'Weather'

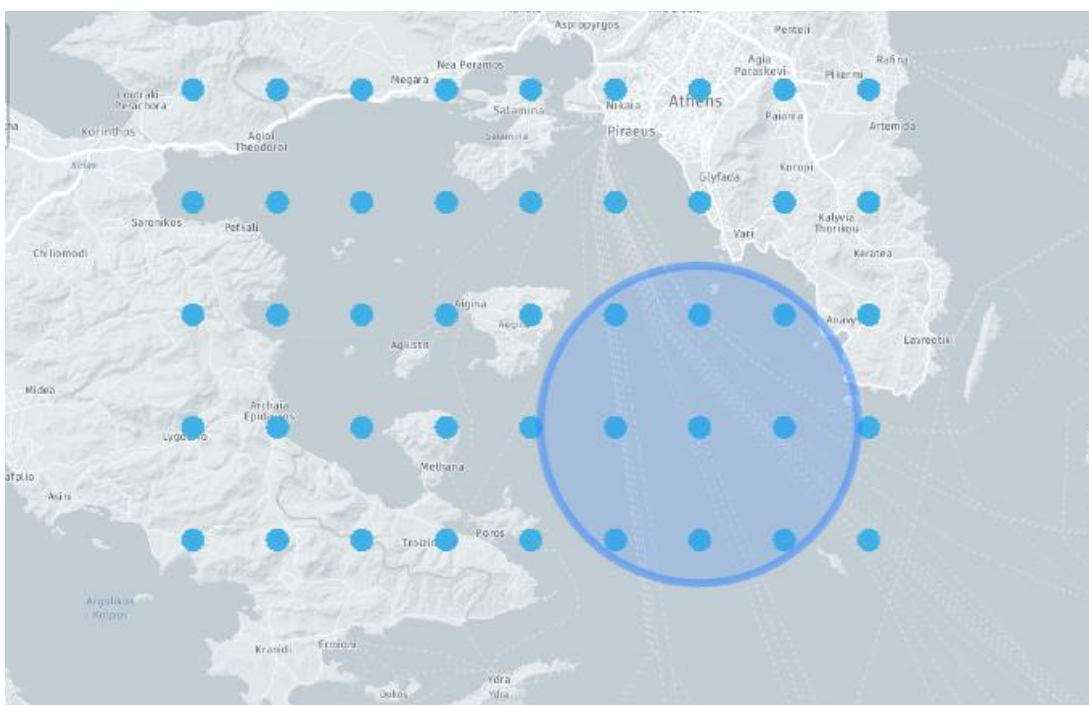
Η βέλτιστη διαχείριση των συλλεχθέντων δεδομένων πραγματοποιείται αποδοτικότερα μέσω της χρήσης δεικτών (indexes) στη βάση δεδομένων, η οποία αποτελεί το επόμενο βήμα της προεπεξεργασίας δεδομένων. Οι δείκτες (indexes) χρησιμοποιούνται για την αποτελεσματικότερη εκτέλεση αναζητήσεων και διεργασιών-queries μέσα στη συλλογή δεδομένων.[30] Χωρίς τη χρήση δεικτών θα πρέπει να πραγματοποιηθεί αναζήτηση σε όλα τα έγγραφα της εκάστοτε συλλογής, ένα προς ένα, μέχρι να επιλεχθούν όποια αντιστοιχούν στο εκάστοτε query, κάτι το οποίο συνάδει με υψηλό υπολογιστικό κόστος. Η εφαρμογή δεικτών που φέρουν συγκεκριμένα κριτήρια αναζήτησης, από την άλλη, συμβάλλει στην γρηγορότερη εκτέλεση αναζητήσεων-queries, εφόσον πραγματοποιεί στοχευμένη αναζήτηση εγγράφων. Για τις ανάγκες της εργασίας χρησιμοποιούνται δύο (2) δείκτες για την καλύτερη διαχείριση της συλλογής vessels. Ο πρώτος δείκτης, με το όνομα 'vessel_id_1' αφορά την ταχύτερη αναζήτηση και προσπέλαση εγγράφων βάσει της μεταβλητής 'vessel_id'. Στον ακόλουθο Πίνακα 8 παρουσιάζονται οι χρόνοι εκτέλεσης αναζήτησης με τη χρήση του δείκτη vessel_id_1 και χωρίς την εφαρμογή του. Ο δεύτερος δείκτης ονομάζεται 'location.coordinates_2dsphere' και αποτελεί 2D sphere index¹⁸ ο οποίος χρησιμοποιείται για την ανάκτηση εγγράφων πλοίων, η θέση των οποίων βρίσκεται μεταξύ ενός συγκεκριμένου ορίων συντεταγμένων.

¹⁸ 2dsphere Index: υποστηρίζει ερωτήματα που υπολογίζουν γεωμετρικές σε μια σφαίρα παρόμοια με τη Γη.

	Χρόνος Αναζήτησης (ms)
Χωρίς την χρήση vessel_id_1 index	9940
Με την χρήση vessel_id_1 index	3553

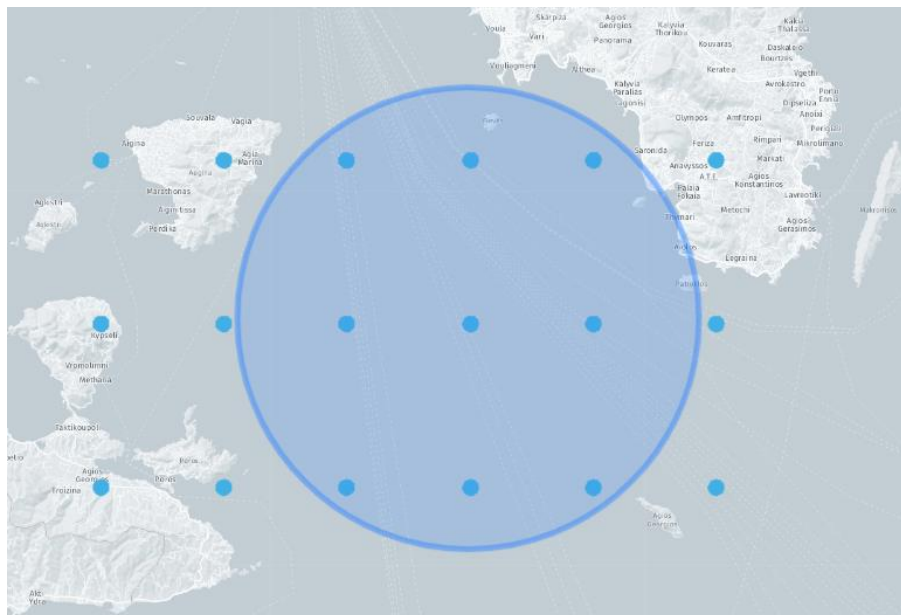
Πίνακας 8: Χρόνοι Εκτέλεσης Αναζήτησης Με/Χωρίς την Χρήση index

Η εργασία αυτή πραγματεύεται την αποτελεσματική μετακίνηση πλοίων στα πλαίσια συντήρησης ενός αιολικού πάρκου. Εφόσον το χρησιμοποιούμενο σύνολο δεδομένων δεν περιέχει δεδομένα σχετικά με ανεμογεννήτριες -και πιο συγκεκριμένα τις θέσεις αυτών- χρησιμοποιείται ως αιολικό πάρκο ένα υποσύνολο των σημείων λήψης δεδομένων καιρού. Ειδικότερα, θεωρείται ως αιολικό πάρκο το σύνολο των σημείων εντός του κύκλου των Εικόνα 13 και Εικόνα 14. Η επιλογή των σημείων έγινε τυχαία.



Εικόνα 13: Θέσεις ανεμογεννητριών αιολικού πάρκου

Αλγόριθμος Δρομολόγησης Πλοίων Διεργασιών Υπεράκτιου Αιολικού Πάρκου για τη Διαχείριση Καυσίμων



Εικόνα 14: Θέσεις ανεμογεννητριών αιολικού πάρκου σε μεγέθυνση

Ο ορισμός του αιολικού πάρκου, για την εκπόνηση της εργασίας, συνάδει με την κατάλληλη επεξεργασία των αντίστοιχων εγγραφών η οποία με τη σειρά της απλοποιείται μέσω των aggregation pipelines, μιας λειτουργίας που προσφέρει το πρόγραμμα MongoDB Compass. Ένα aggregation pipeline αποτελείται από ένα ή περισσότερα στάδια επεξεργασίας εγγραφών μιας συλλογής, απαιτώντας ελάχιστη χρήση κώδικα. [31] Στη συλλογή weather που αφορά τα δεδομένα καιρού, ύστερα από την χειροκίνητη επιλογή των σημείων που θα χρησιμοποιηθούν ως ανεμογεννήτριες, εκτελέστηκε query κατά το οποίο επιλέχθηκαν οι εγγραφές της συλλογής που αντιστοιχούσαν στις συντεταγμένες που αναγράφονται στον Πίνακα 9. Κατά αυτό το τρόπο, απομονώθηκαν τα δεδομένα καιρού που είναι απαραίτητα για την εργασία, τα οποία αποθηκεύτηκαν τελικά, σε ένα csv αρχείο που ονομάστηκε 'selectedWeatherPoints' και απαρτιζόταν από 26280 εγγραφές. Η διαδικασία παρουσιάζεται στο διάγραμμα της Εικόνα 17.



	Συντεταγμένες Σημείων Ανεμογεννητριών	
	Γεωγραφικό Μήκος (lon)	Γεωγραφικό Πλάτος (lat)
Ανεμογεννήτρια 1	23.6267557055555	37.7416472
Ανεμογεννήτρια 2	23.7421611611111	37.7416472
Ανεμογεννήτρια 3	23.8575666166666	37.7416472
Ανεμογεννήτρια 4	23.6267557055555	37.6197664399999
Ανεμογεννήτρια 5	23.7421611611111	37.6197664399999
Ανεμογεννήτρια 6	23.8575666166666	37.6197664399999
Ανεμογεννήτρια 7	23.6267557055555	37.49788568
Ανεμογεννήτρια 8	23.7421611611111	37.49788568
Ανεμογεννήτρια 9	23.8575666166666	37.49788568

Πίνακας 9: Συντεταγμένες Ανεμογεννητριών

Η χρήση των aggregation pipelines συνεχίστηκε και στη συλλογή vessels για την επιλογή πλοίων. Όπως και στην επιλογή σημείων αιολικού πάρκου, έτσι και σε αυτή τη συλλογή επιλέχθηκε τυχαία σημείο στη στεριά ως ναυπηγείο, δηλαδή ως σημείο εκκίνησης και επιστροφής των πλοίων. Στη συνέχεια μέσω του aggregation pipeline (ενδεικτικό παράδειγμα εμφανίζεται στην Εικόνα 15) έγινε αναζήτηση των εγγραφών πλοίων που απείχαν 27 χιλιόμετρα (km) από το κέντρο του αιολικού πάρκου με τη χρήση της παραμέτρου 'geoNear' · επιλέχθηκαν τα 27km γιατί τόσο απείχε το σημείο εκκίνησης από την κεντρική ανεμογεννήτρια του αιολικού πάρκου. Έπειτα, δημιουργήθηκε λίστα των πλοίων, βάσει του μοναδικού αναγνωριστικού vessel_id, μέσω της παραμέτρου 'group' · προέκυψε ότι τα πλοία που απείχαν την απαιτούμενη απόσταση ήταν 1589. Λόγω της φύσης του προβλήματος της εργασίας δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν οι εγγραφές όλων των πλοίων. Εφόσον γίνεται λόγος για συντήρηση ενός αιολικού πάρκου, σε ένα πραγματικό περιβάλλον δε θα χρησιμοποιούνταν ένας τόσο μεγάλος στόλος πλοίων. Οπότε, επιλέχθηκαν τα 20 πρώτα πλοία της λίστας που προέκυψε και, με νέο aggregation pipeline (πάλι με την χρήση της παραμέτρου 'geoNear'), ανακτήθηκαν οι εγγραφές των πλοίων αυτών (Εικόνα 16). Τέλος, οι εγγραφές που αντιστοιχούσαν στα 20 αυτά πλοία αποθηκεύτηκαν στο csv αρχείο 'geoNearVessels', το οποίο περιείχε 9657 εγγραφές. Η διαδικασία επιλογής και αποθήκευσης των πλοίων και των εγγραφών τους παρουσιάζεται διαγραμματικά στην Εικόνα 18. Οι παραπάνω διαδικασίες προεπεξεργασίας διενεργήθηκαν στη MongoDB μέσω του προγράμματος MongoDB Compass.

Αλγόριθμος Δρομολόγησης Πλοίων Διεργασιών Υπεράκτιου Αιολικού Πάρκου για τη Διαχείριση Καυσίμων

The screenshot shows the Elasticsearch Aggregations interface. The pipeline is named "\$geoNear" and contains two stages: "\$geoNear" and "\$group".

\$geoNear Stage: The configuration is `{ locale: 'simple' }`. The output shows a sample of 10 documents. The first document is:

```
{
  near: { type: 'Point', coordinates: [ 23.7421611611111,
  distanceField: 'dist.calculated',
  maxDistance: 27000,
}
```

\$group Stage: The configuration is `{ _id: null, uniqueValues: { $addToSet: "$vessel_id" } }`. The output shows a sample of 1 document with a list of vessel IDs:

```
1582: "2444050a4f8055387241b150828364981f"
1583: "c4f6c0138eb45cbb0f9d1e63a4b2c75dc8"
1584: "57ea38c1b1388f9df94630dd672b243759f"
1585: "1e5eb573c1f3a9c345ab598ee1fbedad4"
1586: "c19c1b016a4d9dcd07c0273f23f246a140"
1587: "f9a820aaf5f2ef8b05fd31e46969b07018"
1588: "787b221d3f5b2b1b5836e4a3be7c7abd3e"
1589: "a228a3ff61bab05f9ceb1f8a1b373a4853"
```

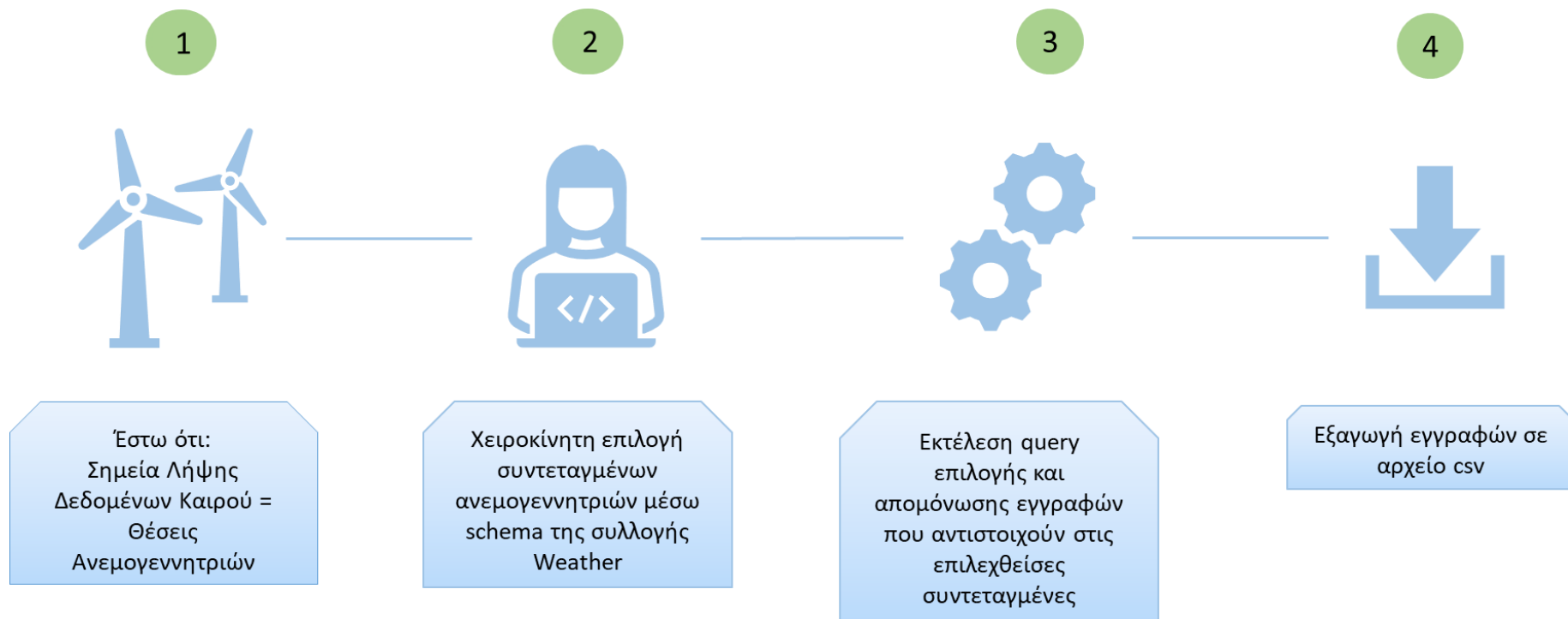
Εικόνα 15: Aggregation Pipeline εύρεσης πλοίων

The screenshot shows the Elasticsearch Aggregations interface. The pipeline is named "\$geoNear" and contains two stages: "\$geoNear" and "\$group".

\$geoNear Stage: The configuration is `{ locale: 'simple' }`. The output shows a sample of 10 documents. The first document is:

```
{
  near: { type: 'Point', coordinates: [ 23.7421611611111, 37.6197664399999 ] },
  distanceField: 'dist.calculated',
  maxDistance: 27000,
  query: { $or: [
    { "vessel_id": "5b219b23fd7c47575c9ee6b996c20d77626488047d34ca018de428a55c731f81" },
    { "vessel_id": "3677df47ce2751324bd8c56971e0b266291028c41bdabe5a6b28369c9a20b5a" },
    { "vessel_id": "f6df27c133534c1f1f6a33fa3adb08e886bc611666e398d5f23e40f5bbb23" },
    { "vessel_id": "f5800b1bf3b29ccf8a12b0d7ecd5033bd415ec1c6db21b1fa7130706858ddef" },
    { "vessel_id": "7d2c7f3ff6b0bd3ae552db7a642916245ee40e7e30b4cc5c4677d6459ce2253ab" },
    { "vessel_id": "da9ab5f1a95cc24cc4330b9dbe2d1fb859dde604c2f54224aca8608d3129157c" },
    { "vessel_id": "0d8c0ae65dfdebeaf508f1e3bff886d7241b739072144d6e4674f8599e39fca" },
    { "vessel_id": "2295159db9c5f9631ae3bf9741984bd05de428d76435566e187c227ba7591b9d" },
    { "vessel_id": "5982d29cba80cfff976da1e5bd7daa28fefcb4bd0c7168a5573db732a81c7e1b2" },
    { "vessel_id": "589fe250846a936ed1ee5368bcd89477958d4a55c810066e0f03f1f12f53470d" },
    { "vessel_id": "2aa3027ea05cb64cae621e64d18eff3ee4a69f724a7b8b97f81528c525af580" },
    { "vessel_id": "3865a863672d5d199be257d3f4e0e23ee43650075ef6da1ae5116589bf0237a6" },
    { "vessel_id": "91ba7758d782b68be0dd06e3bd071df5ed8f98ebbe326c008715a1846987959" },
    { "vessel_id": "89262d12bb13596254b9c2dd4d294f1ebfb41c8821f3ad83f3b3f421b491a8" },
    { "vessel_id": "fe354c4bdf7908d813c4ce889659ac806e279251f0eebcfd98e2c084f9e3821" },
    { "vessel_id": "edd5e151e0bf7b19353aacab45e50bbf92fb5d425fd24020034d780d218caa" },
    { "vessel_id": "cf1a111974b70899e6dca282fa2481d5eb9187c13451d11aed6b867588353fd" },
    { "vessel_id": "d154a809c0906cd9a9ce42c8b7fc20e2538897e0f545fe668af16c355eb4cabd" },
    { "vessel_id": "00bec2716cfe43d5f9df0bedae02116dc5a30a09c614341baddec0ce34a41ecc" },
    { "vessel_id": "c394853227793a0bf247af88326ab326c1a004ef7a3bd70138bdc22089b394cef" },
    { "vessel_id": "8423f3c2da61a22aabf7953af24500660a92824041462ab078127f27978639a" },
  ] }
}
```

Εικόνα 16: Aggregation Pipeline απομόνωσης επιλεγθέντων πλοίων (20 πλοία)



Εικόνα 17: Διαδικασία επιλογής ανεμογεννητριών



Εικόνα 18: Διαδικασία επιλογής πλοίων

6.2.2. Python

Η προεπεξεργασία των δεδομένων δε σταματάει στη MongoDB, διότι τα δεδομένα της εργασίας δεν έχουν ακόμα επεξεργάσιμη μορφή. Μέχρι στιγμής τα δεδομένα, αν και αρκετά επεξεργασμένα, βρίσκονται σε δύο ξεχωριστά αρχεία csv, ενώ λείπουν ακόμα δεδομένα που είναι απαραίτητα για την εκπόνηση της εργασίας. Συνεπώς, σε αυτή την ενότητα αναλύεται η επιπλέον επεξεργασία που έλαβε χώρα, προκειμένου τα δεδομένα να λάβουν την τελική επεξεργάσιμη μορφή τους. Σε αυτήν υπάγονται η διαγραφή περιττών στηλών/δεδομένων, η μετονομασία χρήσιμων στηλών/δεδομένων, η ένωση των δύο αρχείων και η προσθήκη νέων απαραίτητων στηλών/δεδομένων.

Το παρόν κομμάτι της προεπεξεργασίας των δεδομένων διενεργήθηκε στην γλώσσα προγραμματισμού Python (έκδοση 3.10.8) με τη χρήση της βιβλιοθήκης Pandas η οποία ενδείκνυται για την επεξεργασία, τη διαχείριση και την ανάλυση δεδομένων [32].

Το συγκεκριμένο μέρος της προεπεξεργασίας ξεκινάει με την εισαγωγή των δύο συνόλων δεδομένων vessels (δεδομένα πλοίων) και weather (δεδομένα καιρού/ανεμογεννητριών). Υπενθυμίζεται ότι το αρχείο vessels αποτελείται από 9658 γραμμές και 11 στήλες, ενώ το αρχείο weather περιλαμβάνει 26281 γραμμές και 18 στήλες. Σε αυτά τα αρχεία δεν είναι αναγκαίες όλες οι μεταβλητές τους, και κατά συνέπεια, όλες οι στήλες τους. Επομένως, μέσω της εντολής 'drop' διαγράφονται οι στήλες '_id', 'timestamp', 'location.type' και 'dist.calculated' και από τα δύο αρχεία, ενώ αποκόπτονται οι στήλες 'WDIRMAT', 'WDIRMET' από το αρχείο weather και η στήλη 'location.coordinates' από το αρχείο vessels. Στη συνέχεια, για λόγους ευκολίας και αποφυγής σύγχυσης, μετονομάζονται χρήσιμες στήλες που φέρουν ίδια ή παρόμοια ονόματα. Για παράδειγμα στο αρχείο vessels, με την εντολή 'rename', οι στήλες "lon", "lat" μετονομάστηκαν σε "vessel_lon", "vessel_lat" και στο αρχείο weather οι στήλες 'lon' και 'lat' μετονομάστηκαν σε 'turbine_lon' και 'turbine_lat' αντίστοιχα. Ταυτόχρονα, η στήλη 'location.coordinates' μετονομάστηκε σε 'turbine_location_coordinates'.

Προκειμένου να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν τα παραπάνω αρχεία, είναι απαραίτητο να ενωθούν σε ένα ενιαίο αρχείο. Όμως, με την μορφή που έχουν λάβει από το προηγούμενο μέρος της προεπεξεργασίας είναι αδύνατο, καθότι δεν υπάρχει καμία πανομοιότυπη μεταβλητή που να τα συνδέει. Παρόλα αυτά, η ένωσή τους μπορεί να γίνει εφικτή αν η μεταβλητή timestamp_ (ημερομηνία και ώρα σε unix μορφή), που παρατηρείται και στα δύο αρχεία, υποστεί επεξεργασία, διότι υπάρχει ομοιότητα στις ημερομηνίες λήψης δεδομένων και των δύο αρχείων, αλλά όχι στα δευτερόλεπτα καταμέτρησης. Επομένως, είναι απαραίτητο να διαγραφεί η ώρα λήψης δεδομένων και από τα δύο αρχεία.

Η διαδικασία ξεκινάει με την προσθήκη μιας κενής λίστας με το όνομα 'date' και στα δύο αρχεία, η οποία προορίζεται για την καταχώρηση της ημερομηνίας λήψης των δεδομένων του εκάστοτε συνόλου δεδομένων. Στη συνέχεια, γίνεται μετατροπή της μεταβλητής timestamp_ σε κανονική μορφή ημερομηνίας και ώρας και στα δύο αρχεία. Τέλος, 'γεμίζεται' η στήλη 'date' με την ημερομηνία στη νέα της μορφή, χωρίς την ώρα καταμέτρησης. Ενδεικτικό παράδειγμα του

κώδικα της μετατροπής παρουσιάζεται στην Εικόνα 19 για το αρχείο vessels. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για το αρχείο weather.

```
vessels.date = pd.to_datetime(vessels["timestamp_"], unit='ms')
vessels.date= vessels['date'].dt.date #drops the time aspect. keeps the date only.
```

Εικόνα 19: Κώδικας επεξεργασίας ημερομηνίας (timestamp_)

Σε αυτό το σημείο, η μεταβλητή ένωσης 'date' (η ημερομηνία) έχει έρθει σε νέα μορφή η οποία επιτρέπει την ένωση των δύο αρχείων. Η σύμπτυξη των δύο αρχείων σε ένα νέο ενιαίο csv αρχείο επιτυγχάνεται με την εντολή .merge και, στη συνέχεια, αποκτά το όνομα 'completeDatasetMerged'.

Βέβαια, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, απουσιάζουν σημαντικές μεταβλητές για την εκπόνηση της εργασίας, όπως το πρόγραμμα των πλοίων και οι ανεμογεννήτριες. Ο προγραμματισμός των πλοίων αντιμετωπίζεται με την προσθήκη νέας στήλης/μεταβλητής που φέρει το όνομα 'day', όπου εμφανίζονται οι ημέρες εργασίας που αντιστοιχούν στα εκάστοτε πλοία. Για τις ημέρες εργασίας βρέθηκαν τα μοναδικά αναγνωριστικά των πλοίων -δηλαδή τα vessel_id - τα οποία στη συνέχεια καταχωρήθηκαν στη στήλη 'day' και τέλος, αντικαταστάθηκαν με ημέρες της εβδομάδας. Για παράδειγμα, το πλοίο με αναγνωριστικό vessel_id : f6df27c13353c4c1f1f6a33ffa3adba08e886bc611666e398d5f23e40f5bbb23, θα δουλεύει τη Δευτέρα (Mon) κ.ο.κ. Την ίδια στιγμή, τα vessel_id μετονομάστηκαν σε 'Ship_1', 'Ship_2' κ.ο.κ, για ευανάγνωστη προσπέλαση.

Τελευταίο κομμάτι της προεπεξεργασίας αποτελεί η αρίθμηση των ανεμογεννητριών. Στην προηγούμενη ενότητα, αναφέρθηκε πως για λόγους ευκολίας επιλέχθηκαν κάποιες συντεταγμένες λήψης δεδομένων καιρού ως ανεμογεννήτριες. Κάθε ζεύγος των επιλεγμένων συντεταγμένων αποτελεί και τη θέση μίας ανεμογεννήτριας. Στο αρχείο completeDatasetMerged, λοιπόν, προστέθηκε μια ακόμα κενή στήλη με το όνομα 'turbine' η οποία θα υποδεικνύει την ανεμογεννήτρια ενδιαφέροντος για κάθε μέτρηση. Ειδικότερα, ακολουθείται παρόμοια διαδικασία με αυτή της στήλης 'day'. Αρχικά, απομονώνονται τα μοναδικά ζεύγη συντεταγμένων και, σε επόμενο στάδιο, ανατίθεται ένας αριθμός σε κάθε ζεύγος συντεταγμένων, ο οποίος αποτελεί την τελική καταχώρηση στη στήλη 'turbine'. Για παράδειγμα, το ζεύγος συντεταγμένων [23.6267557055555, 37.7416472] αντιστοιχεί στην ανεμογεννήτρια 1 κ.ο.κ. Μετά το πέρας της διαδικασίας, η στήλη 'turbine_location_coordinates' που φέρει τα ζεύγη των συντεταγμένων των ανεμογεννητριών διαγράφεται, εφόσον δεν χρησιμεύει σε κάποια άλλη διαδικασία.

Το τελικό αρχείο με το όνομα completeDatasetMerged το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για το υπόλοιπο της εργασίας, αποτελείται από 695305 γραμμές (695304 εγγραφές + header) και 23 στήλες, με τις τελικές μεταβλητές να καταγράφονται στον ακόλουθο Πίνακα 10. Η διαδικασία επεξεργασίας του τελικού αρχείου δεδομένων περιγράφεται, επίσης, συνοπτικά στο διάγραμμα της Εικόνα 20.

Μεταβλητές τελικού αρχείου (completeDatasetMerged)	
Όνομα	Περιγραφή
APCP	Συνολική βροχόπτωση ανά τρεις (3) ώρες
DPR	Θερμοκρασία σημείου δρόσου
GUST	Ταχύτητα ριπής του ανέμου
PRMSL	Πίεση της μέσης στάθμης της θάλασσας
RH	Σχετική υγρασία
TMAX	Μέγιστη θερμοκρασία της θάλασσας ανά τρίωρο
TMIN	Ελάχιστη θερμοκρασία της θάλασσας ανά τρίωρο
TMP	Θερμοκρασία της θάλασσας κατά τη λήψη
UGRD	Κατεύθυνση του αέρα στον κατακόρυφο/κάθετο άξονα
VGRD	Κατεύθυνση του αέρα στον οριζόντιο άξονα
VIS	Ορατότητα
WSPD	Ταχύτητα αέρα
turbine_lat	Γεωγραφικό πλάτος ανεμογεννήτριας
turbine_lon	Γεωγραφικό μήκος ανεμογεννήτριας
vessel_id	Κωδικός πλοίου
vessel_lon	Γεωγραφικό μήκος πλοίου
vessel_lat	Γεωγραφικό πλάτος πλοίου
heading	Κατεύθυνση πλοίου
speed	Ταχύτητα πλοίου
course	Πορεία πλοίου
date	Ημερομηνία
day	Ημέρα εργασίας πλοίου
turbine	Αριθμός ανεμογεννήτριας

Πίνακας 10: Μεταβλητές τελικού αρχείου (completeDatasetMerged)



Εικόνα 20: Διαδικασία επεξεργασίας τελικού αρχείου δεδομένων (*completeDatasetMerged*)

6.3. Επιλογή Χαρακτηριστικών (Feature Selection)

Η προεπεξεργασία των δεδομένων έληξε με την συγχώνευση των συνόλων δεδομένων vessels και weather σε ένα νέο ενιαίο σύνολο δεδομένων, το completeDatasetMerged, το οποίο θα χρησιμοποιείται από εδώ και στο εξής για τις ανάγκες της εργασίας. Παρά την ολοκλήρωση της προεπεξεργασίας, εκκρεμεί το τελικό στάδιο της ανάλυσης των δεδομένων πριν την υλοποίηση του αλγορίθμου, το οποίο αφορά την επιλογή χαρακτηριστικών (feature selection). Ειδικότερα, ως επιλογή χαρακτηριστικών θεωρείται η διαδικασία κατά την οποία διαχωρίζονται και επιλέγονται οι σημαντικότερες και πιο σχετικές μεταβλητές για την εκπαίδευση ενός αλγορίθμου μηχανικής μάθησης. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται πριν την έναρξη ενός μοντέλου μηχανικής μάθησης, με στόχο την μείωση των διαστάσεων και, κατ' επέκταση, του περιθωρίου λάθους εκτιμήσεων. [33] Η παραπάνω μέθοδος οδηγεί, τελικώς, στην αύξηση της αποδοτικότητας του αλγορίθμου μηχανικής μάθησης, εφόσον απαιτείται λιγότερος χρόνος για την εκπαίδευσή του. Στα πλαίσια της εργασίας η επιλογή χαρακτηριστικών εφαρμόζεται για την εύρεση των μεταβλητών που σχετίζονται εντονότερα με την μεταβλητή της ταχύτητας, προκειμένου να ελεγχθεί από τι επηρεάζεται περισσότερο αυτή. Επισημαίνεται πως αναζητούνται μεταβλητές σχετικές με την ταχύτητα διότι, η ταχύτητα και η κατανάλωση καυσίμου συσχετίζονται. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα ενός σκάφους, τόσο αυξάνεται και η κατανάλωση των καυσίμων του. Επομένως, οι μεταβλητές που επηρεάζουν την ταχύτητα ενός πλοίου, ενδεχομένως να συμβάλλουν και στην καλύτερη διαχείριση των καυσίμων αυτού.

Πρώτο βήμα της διαδικασίας επιλογής χαρακτηριστικών αποτελεί η ανάλυση ολόκληρου του συνόλου δεδομένων που επιτυγχάνεται μέσω της βιβλιοθήκης pandas profiling, η οποία αξιοποιείται για την πραγματοποίηση περιγραφικής ανάλυσης (descriptive analysis) των δεδομένων ενός DataFrame¹⁹. [34] Η προαναφερθείσα ανάλυση προσφέρει γενικές πληροφορίες για τις μεταβλητές του συνόλου δεδομένων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 21, και παράλληλα εμφανίζει τις αλληλεπιδράσεις των μεταβλητών μεταξύ τους μέσω αντίστοιχων διαγραμμάτων, όπως το διάγραμμα συσχέτισης Spearman (Εικόνα 22) και το διάγραμμα συσχέτισης Pearson (Εικόνα 23).

¹⁹ DataFrame: μια δισδιάστατη δομή δεδομένων στην οποία μπορούν να αποθηκευτούν δεδομένα διαφόρων μορφών/τύπων (χαρακτήρες, ακέραιοι, δεκαδικοί, κατηγορικά δεδομένα κ.ο.κ) σε στήλες. [35][35]

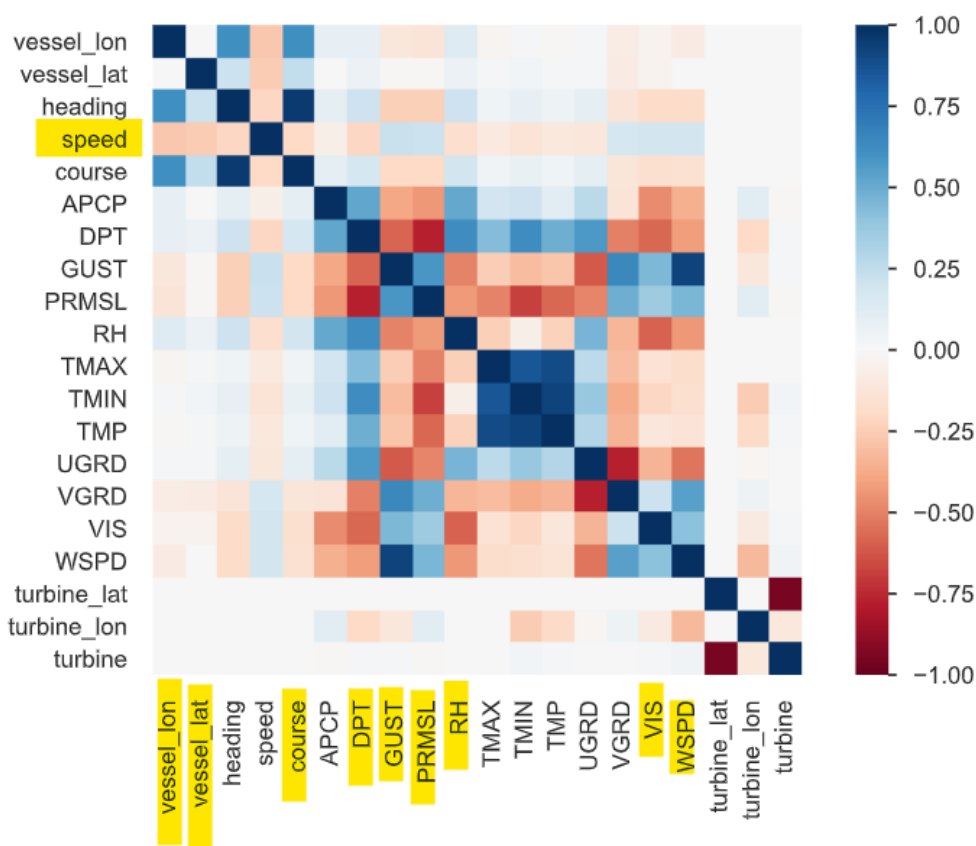
Αλγόριθμος Δρομολόγησης Πλοίων Διεργασιών Υπεράκτιου Αιολικού Πάρκου για τη Διαχείριση Καυσίμων

Overview	Alerts 29	Reproduction	
Dataset statistics		Variable types	
Number of variables	23	Categorical	4
Number of observations	695304	Numeric	18
Missing cells	0	Unsupported	1
Missing cells (%)	0.0%		
Duplicate rows	201060		
Duplicate rows (%)	28.9%		
Total size in memory	143.4 MiB		
Average record size in memory	216.3 B		

Εικόνα 21: Γενικές πληροφορίες συνόλου δεδομένων

Οι γενικές πληροφορίες αφορούν τον αριθμό των μεταβλητών (number of variables) του συνόλου δεδομένων που ανέρχονται στις 23, τον αριθμό παρατηρήσεων (number of observations) -δηλαδή των αριθμό των γραμμών- οι οποίες είναι 695304, τις μηδενικές ελλειψίες τιμές (missing cells) σε αριθμό και σε ποσοστό και τις διπλότυπες εγγραφές²⁰ (duplicate rows) σε αριθμό και ποσοστό που φτάνουν τις 201060 και το 28.9% αντίστοιχα. Επιπλέον, παρουσιάζεται και η μνήμη που καταλαμβάνει (143,4 MB) το profiling. Τέλος, εμφανίζονται οι κατηγορίες των μεταβλητών, οι οποίες είναι τρεις * κατηγορικές (categorical - 4), αριθμητικές (numeric - 18), μη-υποστηρικτές (unsupported - 1).

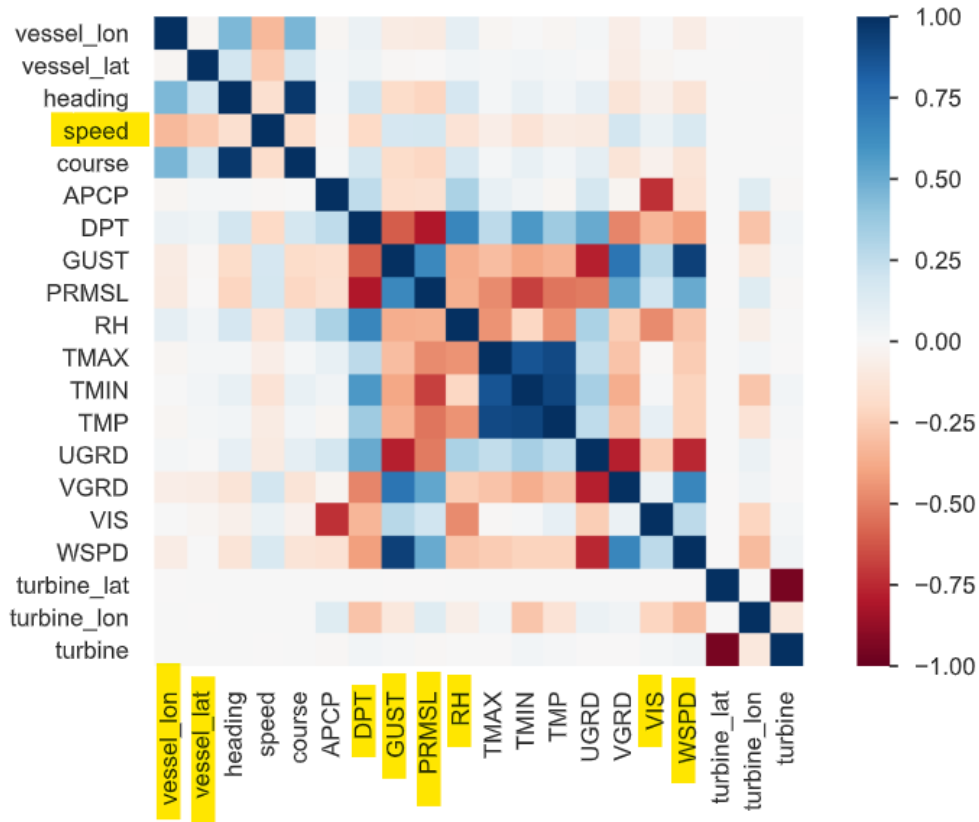
²⁰ Οι διπλότυπες εγγραφές προέκυψαν λόγω του τρόπου ένωσης των δύο συνόλων δεδομένων. Η ύπαρξή τους δεν επηρεάζει την έκβαση των αποτελεσμάτων των όποιων διεργασιών.



Εικόνα 22: Διάγραμμα συσχέτισης Spearman

Το διάγραμμα συσχέτισης Spearman απεικονίζει τη σχέση που έχουν ή δεν έχουν δύο μεταβλητές μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, δείχνει το κατά πόσο είναι μονότονη ή όχι η συσχέτισή τους, δηλαδή αν μεταβάλλονται προς την ίδια κατεύθυνση ή όχι. [36] Στο παραπάνω διάγραμμα οι υπογραμμισμένες μεταβλητές του οριζόντιου άξονα, είναι αυτές που φέρουν εντονότερη συσχέτιση με την μεταβλητή της ταχύτητας του κατακόρυφου άξονα (επίσης υπογραμμισμένη). Ειδικότερα, παρατηρείται πως οι μεταβλητές RH, vessel_lon, vessel_lat, course και DPT έχουν αρνητική σχέση με την ταχύτητα, που σημαίνει πως μεταβάλλονται αντίθετα. Για παράδειγμα, όταν μειώνεται η σχετική υγρασία (RH), η ταχύτητα αυξάνεται, κάτι το οποίο συνάδει με την πραγματικότητα, εφόσον δημιουργείται μεγαλύτερη αντίσταση στην κίνηση του πλοίου όταν αυξάνεται η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας. Από την άλλη πλευρά οι μεταβλητές GUST, PRMSL, VIS και WSPD έχουν θετική συσχέτιση με την ταχύτητα, που σημαίνει ότι μεταβάλλονται προς την ίδια κατεύθυνση. Για παράδειγμα, όταν αυξάνεται η ορατότητα (VIS), ένα σκάφος τείνει να αυξήσει την ταχύτητά του.

Αλγόριθμος Δρομολόγησης Πλοίων Διεργασιών Υπεράκτιου Αιολικού Πάρκου για τη Διαχείριση Καυσίμων



Εικόνα 23: Διάγραμμα συσχέτισης Pearson

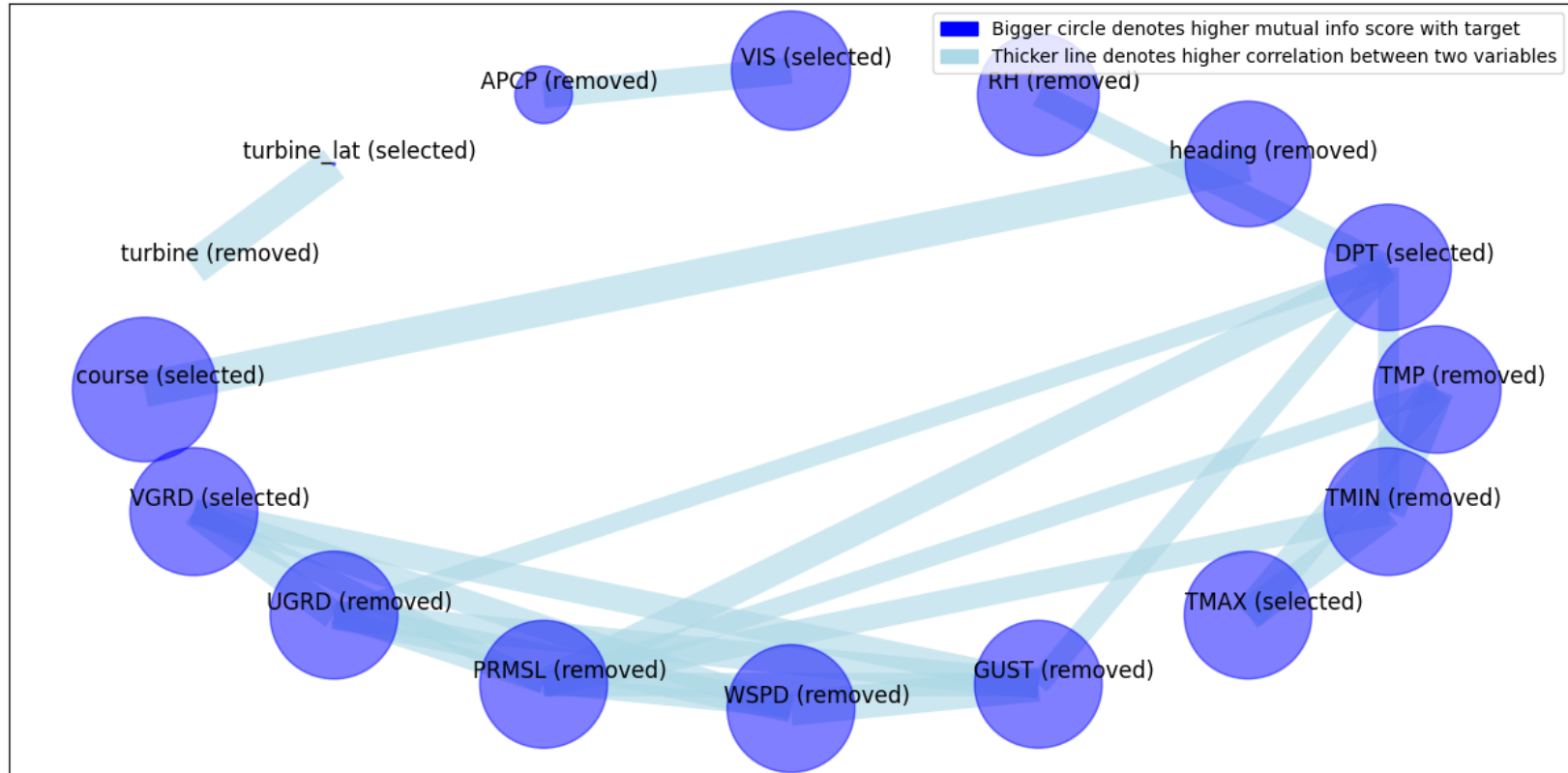
Το διάγραμμα της Εικόνα 23, αφορά τη συσχέτιση Pearson των μεταβλητών του συνόλου δεδομένων. Όπως και η συσχέτιση Spearman, έτσι και η συσχέτιση Pearson εμφανίζει το κατά πόσο δύο μεταβλητές μεταβάλλονται προς την ίδια κατεύθυνση ή όχι. Όμως, η συσχέτιση Pearson εμφανίζει επιπλέον το κατά πόσο οι μεταβλητές που συσχετίζονται μεταβάλλονται με τον ίδιο ρυθμό (rate).[36] Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται πως οι μεταβλητές που συσχετίζονταν με την ταχύτητα βάσει της συσχέτισης Spearman, συσχετίζονται και σύμφωνα με τη συσχέτιση Pearson. Αυτό που αλλάζει, όμως, είναι το χρώμα της εκάστοτε συσχέτισης. Για παράδειγμα, η συσχέτιση speed-vessel_lat έχει εντονότερο κόκκινο χρώμα σε σχέση με το προηγούμενο διάγραμμα. Αυτό σημαίνει πως, ναι μεν υπάρχει αρνητική συσχέτιση μεταξύ τους, αλλά ταυτόχρονα υπάρχει και εντονότερη διαφορά στο ρυθμό με τον οποίο μεταβάλλονται (rate). Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και με τη σχέση των μεταβλητών VIS-speed, οι οποίες συσχετίζονται θετικά.

Από τις παραπάνω συσχετίσεις προκύπτει ότι η ταχύτητα ενός σκάφους επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες, κάτι το οποίο συνάδει με την πραγματικότητα. Επιπλέον, οι συσχετιζόμενες με την ταχύτητα μεταβλητές, λόγω του ότι είναι καιρικές, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την εύρεσης της ευνοϊκότερης διαδρομής για τα πλοία. Παρόλα αυτά, δεν είναι χρήσιμες και οι οκτώ (8) καιρικές μεταβλητές για τον υπολογισμό της αποτελεσματικότερης διαδρομής ενός πλοίου, και κατ' επέκταση της μείωσης της κατανάλωσης καυσίμων του, διότι κάποιες από αυτές συσχετίζονται έντονα και μεταξύ τους. Για παράδειγμα, οι μεταβλητές GUST και DPT συσχετίζονται θετικά και οι δύο με τη μεταβλητή speed, αλλά παρουσιάζουν έντονη αρνητική συσχέτιση μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι δεν χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν και οι δύο, εφόσον η μία δίνει πληροφορία για την άλλη και, παράλληλα, έχουν την ίδια συσχέτιση με την μεταβλητή ενδιαφέροντος, που είναι η ταχύτητα. Για να επιλεγθούν οι απαραίτητες και πιο σημαντικές μεταβλητές που επηρεάζουν την ταχύτητα, πραγματοποιείται επιλογή χαρακτηριστικών (feature selection) σε όλο το σύνολο δεδομένων, βάσει της μεταβλητής speed.

Η επιλογή χαρακτηριστικών πραγματοποιείται με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης featurewiz [37] της Python, η οποία χρησιμεύει για την επιλογή χαρακτηριστικών και την εύρεση των σημαντικότερων μεταβλητών σε ένα σύνολο δεδομένων γενικότερα. Σε αυτό το μέρος της εργασίας γίνεται επιλογή των σημαντικότερων μεταβλητών -αναφορικά με την παροχή πληροφοριών- του συνόλου δεδομένων σε σχέση με την ταχύτητα (speed).

Το πρώτο βήμα της επιλογής χαρακτηριστικών αφορά την αναζήτηση για τις μη συσχετιζόμενες μεταβλητές σε όλο το σύνολο δεδομένων (SULOV- Searching for Uncorrelated List Of Variables). Οι μεταβλητές αυτές προκύπτουν με αφαιρετική μέθοδο κατά την οποία απαλείφονται, αρχικά, όλες οι μεταβλητές οι οποίες παρουσιάζουν μεγάλη συσχέτιση μεταξύ τους. Στο διάγραμμα της Εικόνα 24 παρουσιάζεται το διάγραμμα SULOV στο οποίο εμφανίζονται οι σχέσεις των μεταβλητών. Το μέγεθος των κύκλων συμβολίζει το ποσοστό κοινής πληροφορίας (Mutual Info Score) μεταξύ της εκάστοτε μεταβλητής και της μεταβλητής ενδιαφέροντος (target variable) που είναι η ταχύτητα * όσο μεγαλύτερο το μέγεθός της, τόσο μεγαλύτερο το ποσοστό κοινής πληροφορίας. Το πάχος των γραμμών συμβολίζει τη συσχέτιση μεταξύ δύο μεταβλητών * όσο παχύτερη είναι η γραμμή, τόσο εντονότερη είναι η συσχέτιση δύο μεταβλητών.

In SULO, we repeatedly remove features with lower mutual info scores among highly correlated pairs (see figure),
SULO selects the feature with higher mutual info score related to target when choosing between a pair.

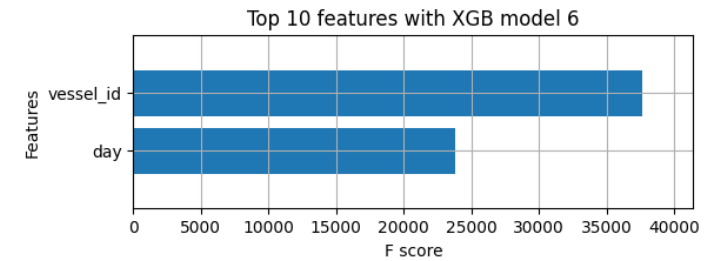
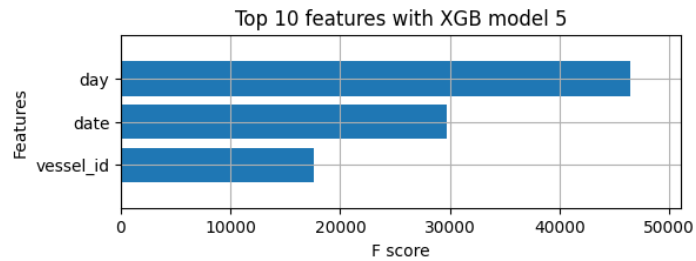
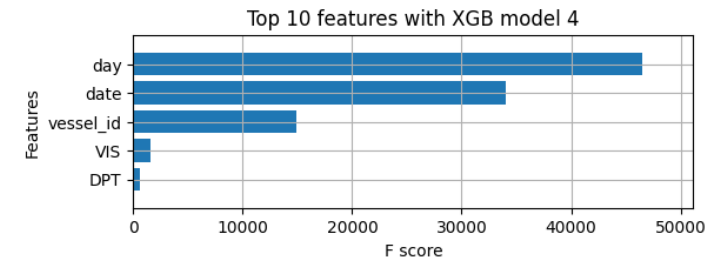
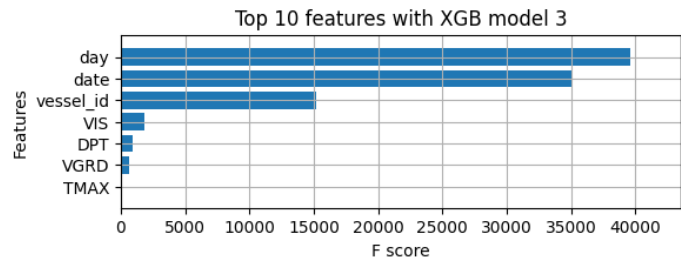
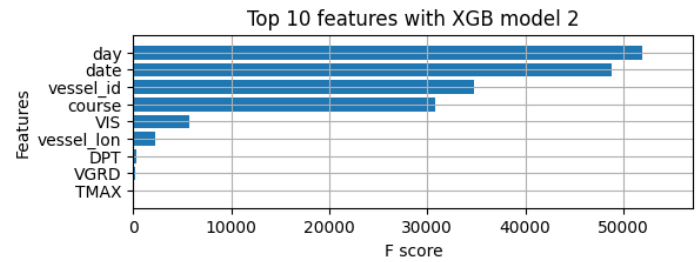
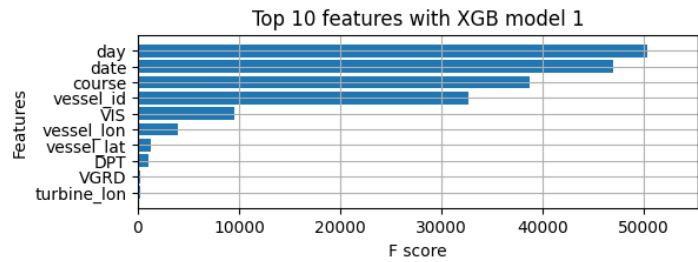


Εικόνα 24: Διάγραμμα SULO - επιλογή χαρακτηριστικών

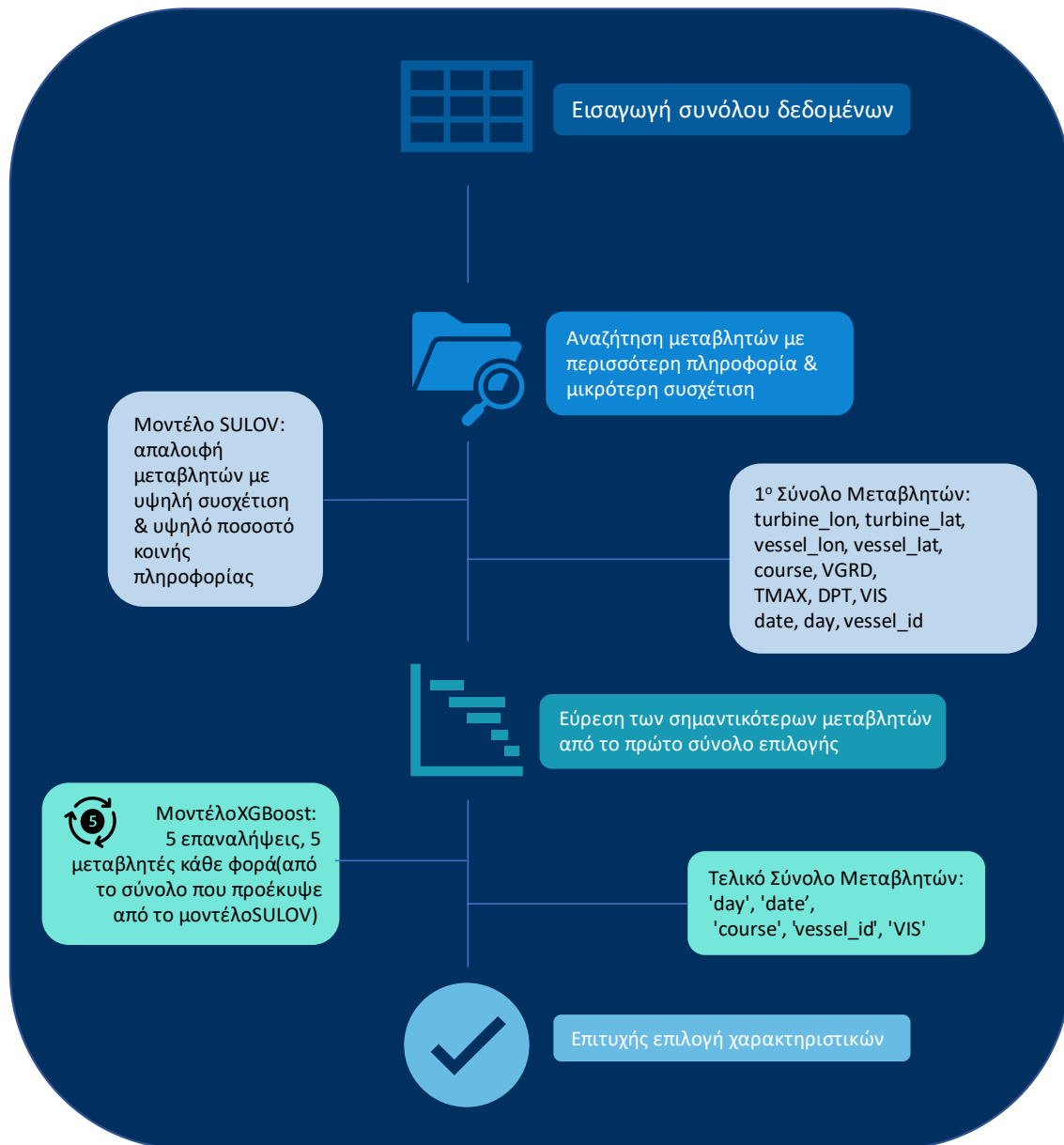
Οι μεταβλητές του συνόλου δεδομένων που φαίνεται να έχουν την υψηλότερη συσχέτιση μεταξύ τους, και αυτές που παρέχουν την περισσότερη πληροφορία είναι οι: 'turbine_lon', 'vessel_lat', 'vessel_lon', 'course', 'VGRD', 'TMAX', 'DPT', 'VIS' και 'turbine_lat', καθότι φέρουν τα υψηλότερα ποσοστά κοινής πληροφορίας με τα χαμηλότερα ποσοστά συσχέτισης μεταξύ τους. Σε επόμενο στάδιο, στις παραπάνω εννέα (9) μεταβλητές προστίθενται οι τρεις κατηγορικές²¹ μεταβλητές: 'date', 'day' και 'vessel_id', με αποτέλεσμα το σύνολο των σημαντικών μεταβλητών να ανέρχεται στις δώδεκα (12).

Η περεταίρω ανάλυση των παραπάνω δώδεκα (12) μεταβλητών, με στόχο την εύρεση των πλέον σημαντικότερων μεταξύ αυτών, επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του Recursive XGBoost. Στο Recursive XGBoost, το σύνολο των μεταβλητών που προέκυψε από το μοντέλο SULOV μετατρέπονται όλες οι μεταβλητές, αρχικά, σε αριθμητικές. Στη συνέχεια το Recursive XGBoost εκτελείται πέντε (5) φορές και σε καθεμία επανάληψη επιλέγονται πέντε (5) διαφορετικές μεταβλητές, προκειμένου να βρεθούν εκείνες οι πέντε (5) που προσφέρουν την περισσότερη πληροφορία σε σχέση με την ταχύτητα του πλοίου.[38] Από αυτή τη διαδικασία προκύπτει, τελικά, πως οι σημαντικότερες μεταβλητές σε σχέση με την ταχύτητα είναι οι: 'day', 'date', 'course', 'vessel_id', 'VIS', καθότι παρέχουν πολλή πληροφορία, χωρίς να συσχετίζονται μεταξύ τους. Οι επαναλήψεις του μοντέλου Recursive XGBoost εμφανίζονται στην Εικόνα 25. Η ολοκληρωμένη διαδικασία επιλογής χαρακτηριστικών με την χρήση της βιβλιοθήκης featurewiz, εμφανίζεται στο παρακάτω διάγραμμα της Εικόνα 26.

²¹ Το μοντέλο SULOV λειτουργεί μόνο με αριθμητικές μεταβλητές. Οπότε, οποιοσδήποτε μεταβλητές άλλου τύπου προστίθενται σε επόμενα στάδια της επιλογής χαρακτηριστικών.



Εικόνα 25: Επαναλήψεις Recursive XGBoost - επιλογή χαρακτηριστικών



Εικόνα 26: Διαδικασία επιλογής χαρακτηριστικών (featurewiz)

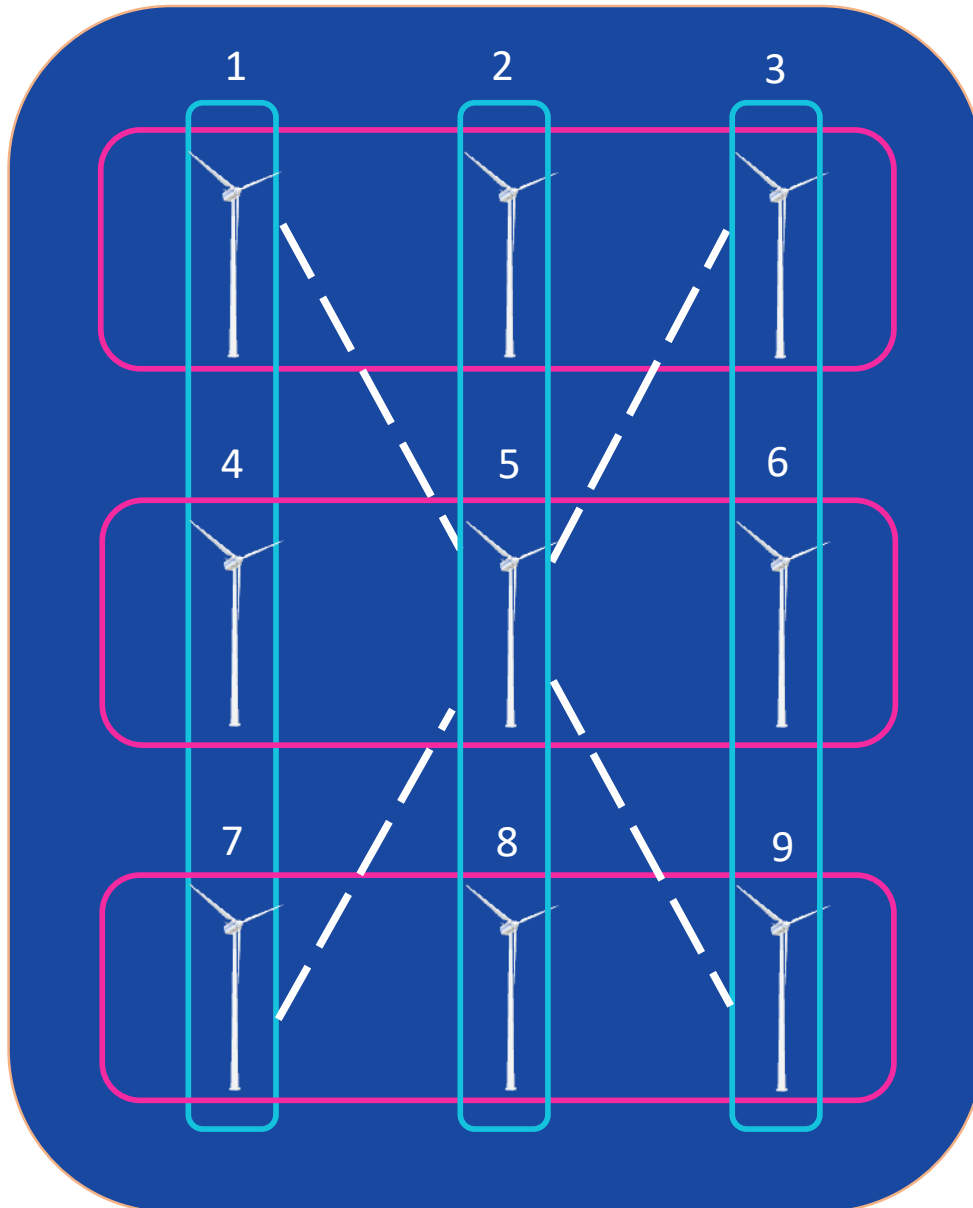
6.4. Προτεινόμενος Αλγόριθμος

Τονίζεται πως η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην επίλυση του προβλήματος δρομολόγησης πλοίων σε θαλάσσια αιολικά πάρκα, με τη λιγότερη δυνατή κατανάλωση καυσίμων. Μέχρι αυτό το σημείο της προσέγγισης έχει πραγματοποιηθεί συλλογή και προεπεξεργασία του συνόλου δεδομένων που χρησιμοποιείται -το οποίο πραγματεύεται δεδομένα καιρού και θέσεων των πλοίων- καθώς και εύρεση των σημαντικότερων μεταβλητών για την επίλυση του προβλήματος μέσω της διαδικασίας επιλογής χαρακτηριστικών. Οι προαναφερθείσες ενέργειες ήταν απαραίτητες για την εκπόνηση της προτεινόμενης προσέγγισης, διότι μέσω αυτών απομονώνονται και επισημαίνονται οι μεταβλητές που επηρεάζουν τη δρομολόγηση των πλοίων και, τελικά, τον προτεινόμενο αλγόριθμο, ο οποίος παρουσιάζεται σε αυτή την ενότητα.

Ο αλγόριθμος που προτείνεται αφορά τη μοντελοποίηση της δρομολόγησης των πλοίων σε ένα γράφο (graph). Ένας γράφος απεικονίζει τη σχέση μεταξύ στοιχείων/μεταβλητών ενός συνόλου και αποτελείται από κόμβους (nodes) και ακμές (edges) · οι κόμβοι είναι τα στοιχεία/μεταβλητές του συνόλου, ενώ οι ακμές απεικονίζουν τη σχέση μεταξύ των μεταβλητών. [39] Στην προσέγγιση της εργασίας, οι κόμβοι του γράφου αντιστοιχούν στις ανεμογεννήτριες του αιολικού πάρκου, ενώ ως ακμές του γράφου απεικονίζονται τα κόστη των διαδρομών μεταξύ των ανεμογεννητριών, τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω.

Το πρώτο στάδιο δημιουργίας του γράφου είναι ο ορισμός του σημείου εκκίνησης και επιστροφής των πλοίων, εφόσον δεν είναι δυνατό να πλέουν επ' άπειρον στη θάλασσα. Για τις ανάγκες της εργασίας, ως τέτοιο σημείο ορίστηκε ένα τυχαίο ζεύγος συντεταγμένων στην ξηρά, κοντά στο αιολικό πάρκο της εργασίας. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν οι διαδρομές μεταξύ των ανεμογεννητριών. Αυτό σημαίνει πως δεν ενώνονταν όλες οι ανεμογεννήτριες μεταξύ τους, αλλά συνδέονταν οριζόντια, κάθετα και διαγώνια, όπως απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα της Εικόνα 27. Αξίζει να τονιστεί πως οι προαναφερθείσες διαδρομές είναι ενδεικτικές και πως ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να εφαρμοστεί για οποιονδήποτε δυνατό συνδυασμό διαδρομών μεταξύ των ανεμογεννητριών στο αιολικό πάρκο.

Η διαδικασία σχεδιασμού του γράφου συνεχίζεται με την επεξεργασία των δρομολογίων των πλοίων. Αναλυτικότερα, σε κάθε ένα από τα είκοσι ένα (21) πλοία που χρησιμοποιούνται ανατέθηκε και μία ημέρα εργασίας. Για παράδειγμα, τα πλοία 'Ship_1', 'Ship_2', 'Ship_3' πραγματοποιούν δρομολόγια τη Δευτέρα, τη Τρίτη και τη Τετάρτη αντίστοιχα. Η ανάθεση ημερών εργασίας στα πλοία είναι απαραίτητη, διότι δεν είναι λογικό και οικονομικά αποδοτικό να λειτουργούν καθημερινά 21 πλοία για 9 ανεμογεννήτριες. Από τη συγκεκριμένη ανάθεση ημερών πλεύσης προκύπτει ότι κάθε ημέρα λειτουργούν τρία (3) πλοία, κατά το μέγιστο, για την εκπόνηση εργασιών σε όλη την έκταση του θαλάσσιου αιολικού πάρκου, πλην τη συντήρηση κάποιας ανεμογεννήτριας. Σε αυτή την περίπτωση, ένα πλοίο ανατίθεται αποκλειστικά στην



Εικόνα 27: Σχηματική αναπαράσταση του αιολικού πάρκου

ανεμογεννήτρια που χρήζει συντήρησης²², ενώ τα άλλα δύο πλοία αναλαμβάνουν τις διεργασίες των υπόλοιπων οκτώ (8) ανεμογεννητριών.

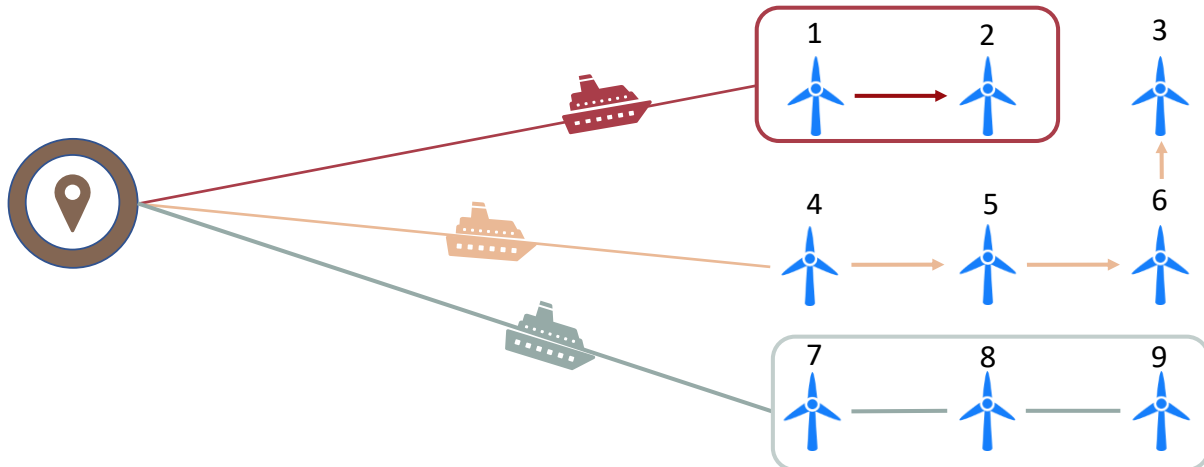
²² Η συντήρηση μιας ανεμογεννήτριας ενός θαλάσσιου αιολικού πάρκου μπορεί να διαρκέσει περισσότερο από μία ημέρα εργασίας. [40] Για τις ανάγκες της προσέγγισης θεωρείται πως η συντήρηση μιας τέτοιας ανεμογεννήτριας, χρειάζεται μία ολόκληρη ημέρα εργασίας.

Το τρίτο βήμα της προσέγγισης αποτελεί ο υπολογισμός του κόστους κάθε διαδρομής μεταξύ των ανεμογεννητριών. Σε αυτό το σημείο του αλγορίθμου υπολογίζονται, αρχικά, οι μέσοι όροι των χρήσιμων μεταβλητών καιρού κάθε ανεμογεννήτριας ξεχωριστά. Ειδικότερα, υπολογίζονται οι μέσοι όροι των μεταβλητών 'TMAX', 'DPT', 'VIS' και 'VGRD' ανά ανεμογεννήτρια για την ημερομηνία που θα επιλεγεί από τον χρήστη. Έπειτα, προστίθενται οι μέσοι όροι των παραπάνω μεταβλητών ανά ζεύγη ανεμογεννητριών αξιοποιώντας τη σύνδεση αυτών, όπως αναφέρεται και παρουσιάζεται στην Εικόνα 27. Για παράδειγμα, οι ανεμογεννήτριες 1,2,3 ενώνονται οριζόντια, οπότε υπολογίζεται το άθροισμα των μέσων όρων των παραπάνω μεταβλητών για τις διαδρομές από την ανεμογεννήτρια 1 στην ανεμογεννήτρια 2 και από την ανεμογεννήτρια 2 στην ανεμογεννήτρια 3, προκειμένου να καλυφθεί η σύνδεση και των τριών ανεμογεννητριών. Ομοίως υπολογίζονται τα κόστη των διαδρομών και των υπόλοιπων ανεμογεννητριών. Τα κόστη των διαδρομών βάσει αυτών των μεταβλητών καιρού είναι σημαντικά για τη δρομολόγηση των πλοίων, καθώς έτσι μπορεί να εξεταστεί ποια διαδρομή είναι η ευνοϊκότερη βάσει των καιρικών συνθηκών που επικρατούν σε κάθε ανεμογεννήτρια.

Η διαδικασία μοντελοποίησης του προβλήματος σε γράφο ολοκληρώνεται με την επιλογή της ημερομηνίας του δρομολογίου από τον χρήστη. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την εκπόνηση του αλγορίθμου είναι περιορισμένου χρονικού διαστήματος (10 Ιανουαρίου 2019 έως 31 Ιουλίου 2019), επομένως ο χρήστης μπορεί να εξετάσει τη δρομολόγηση των πλοίων μόνο για αυτό το διάστημα. Βέβαια, ο αλγόριθμος μπορεί να εφαρμοστεί για οποιοδήποτε χρονικό εύρος, δεδομένου ότι διατίθενται τα αντίστοιχα δεδομένα καιρού. Αφού επιλεγεί η προτιμητέα ημερομηνία δρομολόγησης, εκτελείται ο αλγόριθμος με τη βοήθεια των βιβλιοθηκών 'VRPy' και 'network X' της python. Η βιβλιοθήκη VRPy χρησιμοποιείται για την επίλυση διαφορετικών τύπων προβλημάτων δρομολόγησης οχημάτων (Vehicle Routing Problems) [41], ενώ η network X παρέχει δομές δεδομένων για την αναπαράσταση πολλών γραφημάτων, συμπεριλαμβανομένων απλών γραφημάτων, κατευθυνόμενων γραφημάτων και γραφημάτων με ακμές και κόμβους. [42]

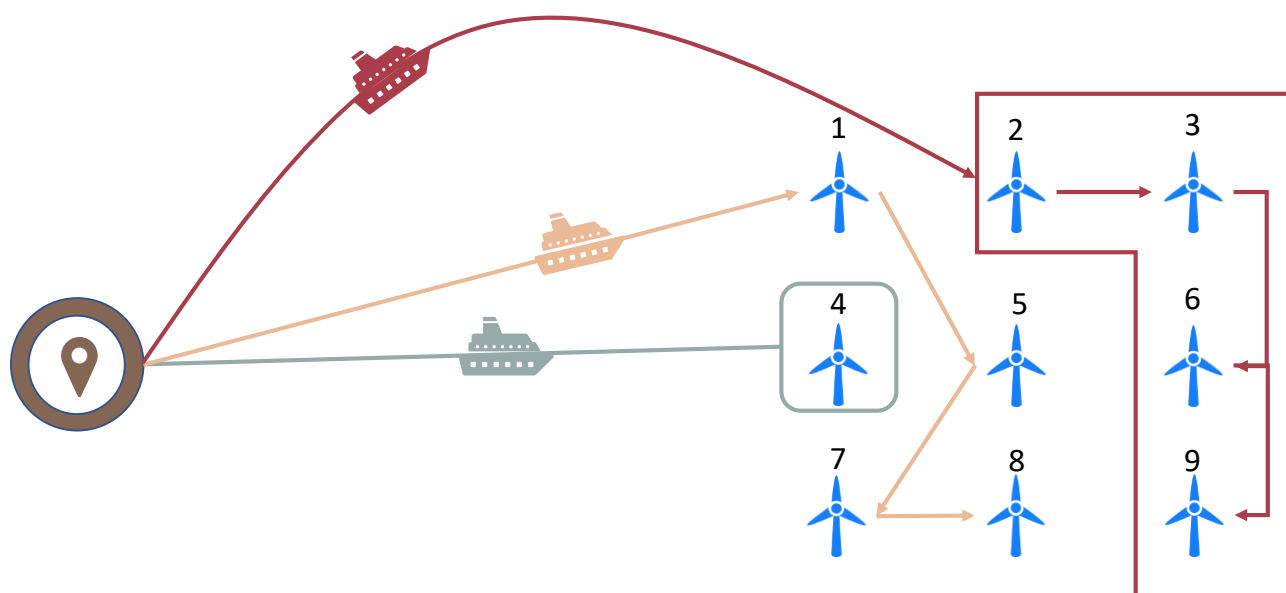
Στις εικόνες Εικόνα 28 και Εικόνα 29 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι δρομολογήσεις πλοίων για την 16^η Ιουλίου 2019 σε περίπτωση κανονικού δρομολογίου (regular routing) και στο ενδεχόμενο συντήρησης της ανεμογεννήτριας 4.

Αλγόριθμος Δρομολόγησης Πλοίων Διεργασιών Υπεράκτιου Αιολικού Πάρκου για τη Διαχείριση Καυσίμων



Εικόνα 28: Απεικόνιση δρομολόγησης πλοίων χωρίς συντήρηση ανεμογεννήτριας (regular routing).

Το παραπάνω διάγραμμα (Εικόνα 28) παρουσιάζει τη δρομολόγηση των πλοίων χωρίς το ενδεχόμενο συντήρησης ανεμογεννήτριας. Σε αυτή την περίπτωση, ανάλογα με την επιλεγμένη ημερομηνία, υπολογίζονται τα δρομολόγια των τριών πλοίων που είναι διαθέσιμα την αντίστοιχη ημέρα. Με τη βοήθεια των προαναφερθέντων βιβλιοθηκών της ρυθμ, προκύπτει ότι το ένα πλοίο κατευθύνεται από το σημείο εκκίνησης προς τις ανεμογεννήτριες 1 και 2 και ύστερα επιστρέφει στο αρχικό σημείο, το δεύτερο πλοίο δρομολογείται από το σημείο εκκίνησης προς τις ανεμογεννήτριες 3,4,5,6 και πίσω και, τέλος, το πλοίο 3 πλέει προς τις ανεμογεννήτριες 7,8,9 και επιστρέφει στο σημείο από όπου ξεκίνησαν όλα τα πλοία.



Εικόνα 29: Απεικόνιση δρομολόγησης πλοίων με συντήρηση ανεμογεννήτριας (turbine maintenance).

Η Εικόνα 29 περιγράφει την εναλλακτική περίπτωση δρομολόγησης, η οποία περιλαμβάνει τη συντήρηση μίας ανεμογεννήτριας. Στο διάγραμμα της προαναφερθείσας εικόνας απεικονίζεται ο προγραμματισμός των πλοίων για την ίδια ημερομηνία με την παραπάνω περίπτωση, αλλά με την επιλογή συντήρησης της ανεμογεννήτριας 4. Σε αυτό το ενδεχόμενο είναι εμφανής η αλλαγή των δρομολογίων που ακολουθούν τα διαθέσιμα πλοία. Στο παράδειγμα, λοιπόν, το πρώτο πλοίο κατευθύνεται προς τις ανεμογεννήτριες 2,3,6,9, το δεύτερο πλοίο πραγματοποιεί δρομολόγιο προς τις ανεμογεννήτριες 1,5,7,8 και, το τρίτο πλοίο κινείται προς την ανεμογεννήτρια που χρήζει συντήρησης, δηλαδή την ανεμογεννήτρια 4. Όπως και στην απλή δρομολόγηση, όλα τα πλοία ξεκινάνε από το ίδιο σημείο και όλα επιστρέφουν στο σημείο από όπου ξεκινά η δρομολόγησή τους.

6.5. Διεπαφή Χρήστη

Ο αλγόριθμος δρομολόγησης που περιγράφεται στις παραπάνω ενότητες συνοδεύεται από μια εύχρηστη και φιλική προς το χρήστη διεπαφή, με στόχο τη δημιουργία μιας ολοκληρωμένης πλατφόρμας δρομολόγησης πλοίων που ονομάζεται 'Wind Wise'.



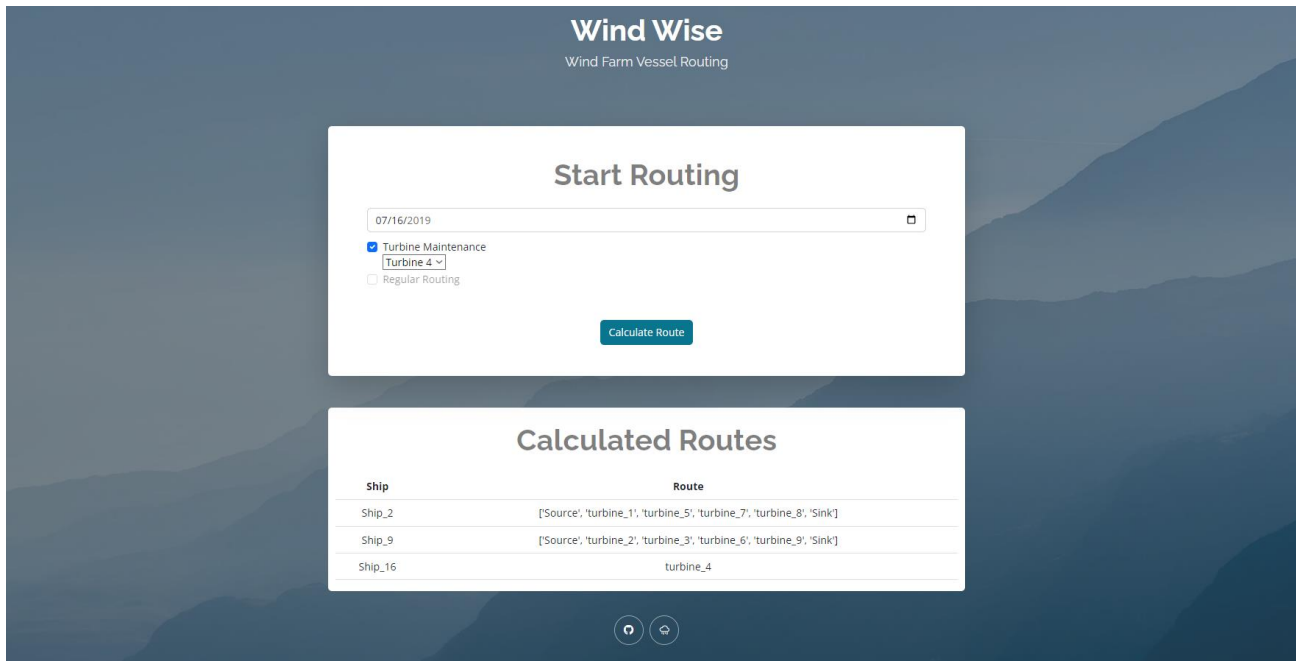
Εικόνα 30: Διεπαφή χρήστη της πλατφόρμας δρομολόγησης 'Wind Wise' (αναζήτηση δρομολογίων).

Η διεπαφή χρήστη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 30, περιλαμβάνει πλαίσιο αναζήτησης δρομολογίων στο οποίο παρέχεται η επιλογή ημερομηνίας δρομολόγησης, καθώς και η δυνατότητα επιλογής συντήρησης ανεμογεννήτριας (turbine maintenance) ή κανονικής δρομολόγησης (regular routing). Στην περίπτωση της συντήρησης παρέχεται η δυνατότητα επιλογής ανεμογεννήτριας, μέσω ενός drop-down μενού που εμφανίζεται κατά τη συγκεκριμένη επιλογή (Εικόνα 31).



Εικόνα 31: Διεπαφή χρήστη της πλατφόρμας δρομολόγησης 'Wind Wise' (επιλογή ανεμογεννήτριας για συντήρηση).

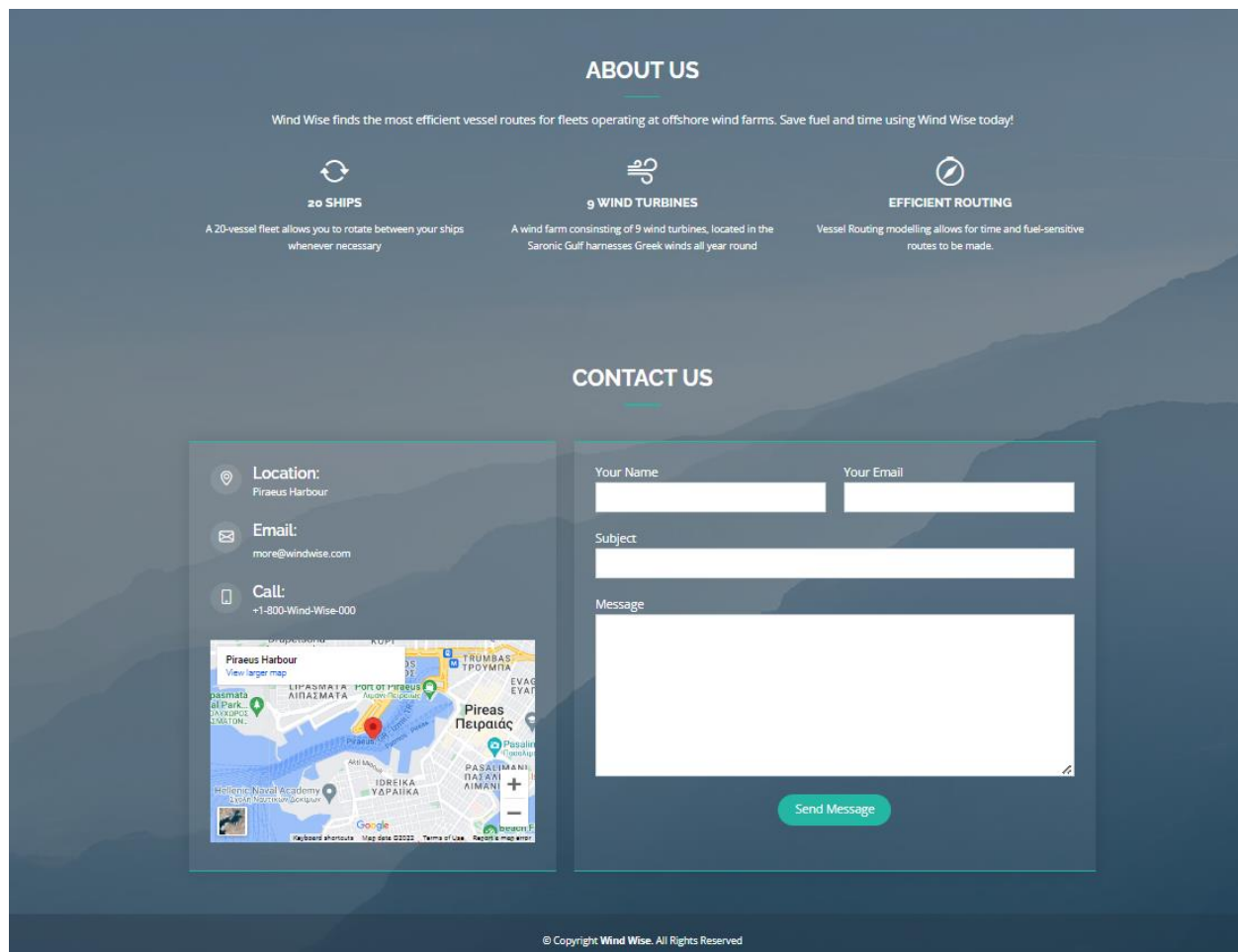
Τα αποτελέσματα αναζήτησης εμφανίζονται κάτω από τη φόρμα αναζήτησης, κατόπιν του υπολογισμού των δρομολογίων, σε ξεχωριστό πλαίσιο (Calculated Routes), όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 32.



Εικόνα 32: Διεπαφή χρήστη της πλατφόρμας δρομολόγησης 'Wind Wise' (εμφάνιση δρομολογίων).

Αλγόριθμος Δρομολόγησης Πλοίων Διεργασιών Υπεράκτιου Αιολικού Πάρκου για τη Διαχείριση Καυσίμων

Εκτός από τη δυνατότητα αναζήτησης και εμφάνισης δρομολογίων στη διεπαφή χρήστη παρέχονται, επίσης, χρήσιμες πληροφορίες για την πλατφόρμα, όπως κουμπιά για το αποθετήριο κώδικα GitHub, όπου παρέχεται και ο κώδικας της εργασίας, και της ιστοσελίδας μετεο για επιπλέον πληροφορίες για τον καιρό θαλασσών.



Εικόνα 33: Διεπαφή χρήστη της πλατφόρμας δρομολόγησης 'Wind Wise' (πληροφορίες & φόρμα επικοινωνίας).

Παράλληλα, προσφέρονται πληροφορίες για τις δυνατότητες λειτουργίας της εφαρμογής 'Wind Wise' (About Us). Ειδικότερα, παρουσιάζεται ο στόλος της εφαρμογής, το πλήθος των ανεμογεννητριών στο θαλάσσιο αιολικό πάρκο της εργασίας και η σημασία της αποτελεσματικής δρομολόγησης. Τέλος, διατίθεται ένας χάρτης της ευρύτερης περιοχής του Πειραιά, όπου βρίσκεται το αιολικό πάρκο, καθώς και μια φόρμα επικοινωνίας με τον εκάστοτε διαχειριστή της εφαρμογής (Εικόνα 33).

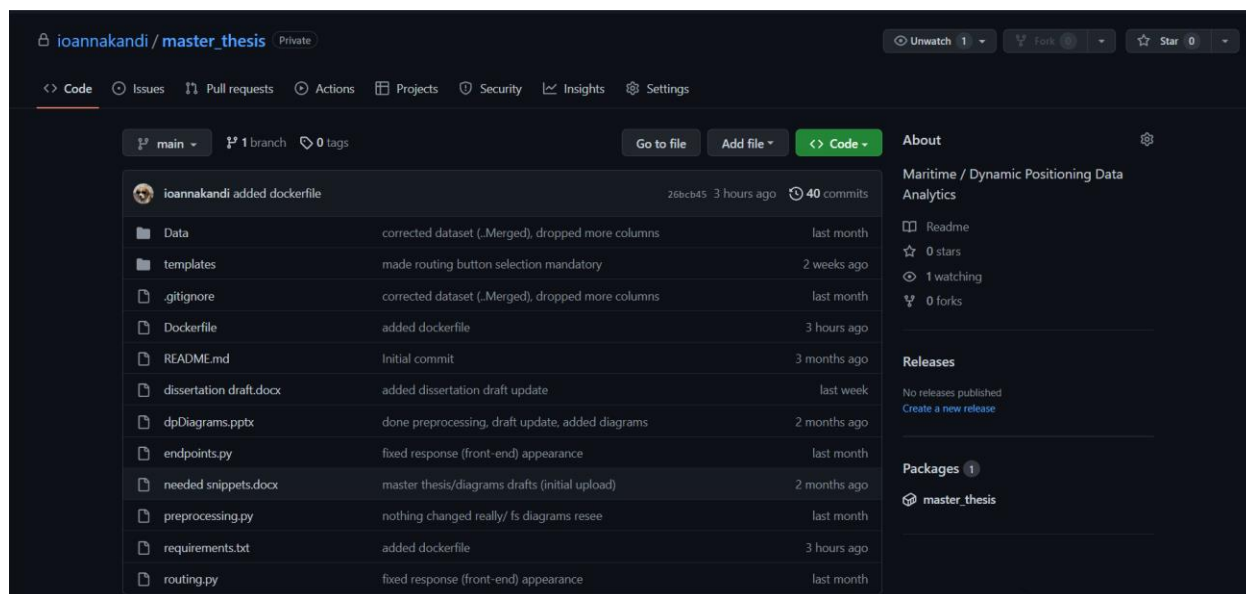
7. Οδηγίες Εγκατάστασης

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος και η αντίστοιχη εφαρμογή που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι διαθέσιμα στο αποθετήριο (repository) GitHub στη διεύθυνση https://github.com/ioannakandi/master_thesis, ενώ το αντίστοιχο image διατίθεται στη διεύθυνση https://github.com/ioannakandi/master_thesis/pkgs/container/master_thesis (Εικόνα 34). Επισημαίνεται πως το συγκεκριμένο αποθετήριο είναι ιδιωτικό, που σημαίνει ότι η πρόσβαση σε αυτό είναι εφικτή ύστερα από την επικοινωνία με e-mail στη διεύθυνση ioannakandi@gmail.com.

Επίσης, για την εγκατάσταση και εκτέλεση της εφαρμογής τοπικά θα πρέπει να είναι εγκατεστημένο το docker [56] και στη συνέχεια να ακολουθηθούν οι επόμενες εντολές.

- ≈ `docker pull ghcr.io/ioannakandi/master_thesis:latest` (λήψη του αντίστοιχου image)
- ≈ `docker run -p5000:5000 ioannakandi/master_thesis` (έναρξη του container της εφαρμογής στην πόρτα 5000)

Τέλος, η εφαρμογή εκτελείται στη διεύθυνση <http://localhost:5000>, όπου διατίθεται η διεπαφή χρήστη.



Εικόνα 34 : Αποθετήριο (repository) GitHub "master_thesis"

8. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, με την εξέλιξη της τεχνολογίας σε όλους τους επιχειρηματικούς κλάδους, έτσι και στον τομέα της ναυτιλίας παρατηρείται ανάπτυξη στην πλοήγηση των πλοίων με τη χρήση των συστημάτων Δυναμικής Τοποθέτησης (Dynamic Positioning Systems). Τα συστήματα αυτά, επιτρέπουν στις πλωτές κατασκευές και τα οχήματα που τα χρησιμοποιούν, να διατηρούν τη θέση και την προκαθορισμένη πορεία τους στηριζόμενα αποκλειστικά στις προπέλες και τους προωθητήρες (thrusters) τους. Τα συστήματα dynamic positioning απαρτίζονται από τρία (3) υποσυστήματα: το σύστημα ελέγχου, το σύστημα προωθητήρων και το σύστημα διαχείρισης ενέργειας. Η σταθερή θέση και πορεία επιτυγχάνονται, αρχικά, μέσω της λήψης δεδομένων καιρού και θέσης των σκαφών, τα οποία συλλέγονται από πλήθος αισθητήρων που διαθέτουν τα σκάφη. Έπειτα, γίνεται επεξεργασία των προαναφερθέντων δεδομένων από το σύστημα ελέγχου έτσι ώστε να παραχθεί η απαραίτητη πληροφορία που θα συμβάλλει στη διατήρηση της ομαλής πορείας του πλοίου. Τέλος, το σύστημα προωθητήρων, βάσει των πληροφοριών από το σύστημα ελέγχου, διατηρεί ή διορθώνει τη δύναμη των προωθητήρων ούτως ώστε να παραμένει σταθερή η πορεία ή η θέση του καραβιού. Καθ' όλη τη διάρκεια χρήσης του συστήματος dynamic positioning, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας, διαχειρίζεται τις γεννήτριες του σκάφους προκειμένου να προληφθεί το ενδεχόμενο συσκότισης (blackout).

Βέβαια, τα συστήματα δυναμικής τοποθέτησης, καθώς και τα δεδομένα αυτών, δε συμβάλλουν μόνο στη χάραξη και διατήρηση της σταθερής πορείας και της θέσης ενός σκάφους, αλλά βοηθούν και στη μείωση της κατανάλωσης των καυσίμων αυτών. Η συλλογή και η επεξεργασία καιρικών δεδομένων που χρησιμοποιεί ένα σύστημα δυναμικής τοποθέτησης, χρήζει καίριας σημασίας για την επίτευξη της ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης καυσίμων των πλοίων καθώς οι καιρικές συνθήκες αποτελούν βασικό προσδιοριστικό παράγοντα της ταχύτητας που θα αναπτύξει το σκάφος, αλλά και της πορείας που θα ακολουθήσει αυτό. Στα πλαίσια της εργασίας, γίνεται λόγος για τη δρομολόγηση πλοίων συντήρησης θαλάσσιων αιολικών πάρκων με στόχο τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων.

Ο αλγόριθμος που προτείνεται μοντελοποιεί ένα θαλάσσιο αιολικό πάρκο ως ένα συνδεδεμένο γράφο που αποτελείται από κόμβους και ακμές, όπου οι κόμβοι αναπαριστούν τις ανεμογεννήτριες του αιολικού πάρκου και οι ακμές αναπαριστούν τη μετακίνηση από τη μία ανεμογεννήτρια στην άλλη. Η κάθε ακμή έχει και το δικό της βάρος, το οποίο αναπαριστά το κόστος μετακίνησης από τον ένα κόμβο στον άλλο. Ειδικότερα, για να προκύψουν οι κόμβοι του γράφου, ήταν απαραίτητη η προεπεξεργασία και η ανάλυση του επιλεχθέντος συνόλου δεδομένων, το οποίο περιείχε μόνο δεδομένα καιρού και θέσεις πλοίων στο ευρύτερο λιμάνι του Πειραιά και στο Σαρωνικό γενικότερα. Από την προαναφερθείσα ανάλυση προέκυψαν όχι μόνο οι θέσεις των ανεμογεννητριών του θαλάσσιου αιολικού πάρκου, αλλά και οι καιρικές μεταβλητές που προσέφεραν την περισσότερη και σημαντικότερη πληροφορία για την αποδοτικότερη δρομολόγηση των πλοίων. Η προτεινόμενη προσέγγιση συνοδεύεται από μια φιλική προς το χρήστη διεπαφή, η οποία περιλαμβάνει εύχρηστη επιλογή παραμέτρων

δρομολόγησης, οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων αναζήτησης, καθώς και παρουσίαση λοιπών χρήσιμων πληροφοριών για αυτόν.

Βέβαια, παρόλο που η παρούσα εργασία επιτυγχάνει το στόχο της, ο οποίος αφορά τη αποδοτικότερη δρομολόγηση πλοίων και κατ' επέκταση τη διαχείριση κατανάλωσης καυσίμων αυτών, διαθέτει περιθώρια βελτίωσης. Αρχικά, καλό θα ήταν να συλλέγονται δεδομένα καιρού σε πραγματικό χρόνο, διότι τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση αυτής ήταν περιορισμένα. Επίσης, σε επόμενο στάδιο θα μπορούσαν να συμπεριλαμβάνονται και δεδομένα μηχανής και τεχνικών χαρακτηριστικών των εκάστοτε πλοίων, ούτως ώστε η δρομολόγηση να αντιπροσωπεύει και πιο σύνθετα πραγματικά σενάρια χρήσης, αλλά και να γίνει εφικτή η ανάλυση καυσίμων, όπως αναφέρεται στην ενότητα 4. Διαχείριση Κατανάλωσης Καυσίμων & Ανάλυση Δεδομένων. Παράλληλα, θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη ένας στόλος με πλοία διαφορετικού τύπου και διαφορετικών προδιαγραφών, για τον ίδιο λόγο. Τέλος, καλό θα ήταν να περιλαμβάνεται πλήθος τύπων συντήρησης, εφόσον σε ένα πραγματικό σενάριο οι διεργασίες συντήρησης διαφέρουν σε τύπο και σε χρόνο.

Αναφορές

- [1] Du, J., Hu, X., Krstić, M., & Sun, Y. (2018). Dynamic positioning of ships with unknown parameters and disturbances. *Control Engineering Practice*, 76, 22-30.
- [2] Breivik, M., Kvaal, S., & Østby, P. (2015). From Eureka to K-Pos: dynamic positioning as a highly successful and important marine control technology. *IFAC-PapersOnLine*, 48(16), 313-323.
- [3] Shaw, J. A. (2003). The PID control algorithm. *Process control solutions*, 2.
- [3] Loueipour, M., Keshmiri, M., Danesh, M., & Mojiri, M. (2015). Wave filtering and state estimation in dynamic positioning of marine vessels using position measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 64(12), 3253-3261.
- [4] Faÿ, H. (1990). *Dynamic Positioning Systems: Principles, Design, and Applications*. Editions OPHRYS.
- [5] Balchen, J. G., Jenssen, N. A., Mathisen, E., & Sælid, S. (1980). A dynamic positioning system based on Kalman filtering and optimal control.
- [6] Tannuri, E. A., Agostinho, A. C., Morishita, H. M., & Moratelli Jr, L. (2010). Dynamic positioning systems: An experimental analysis of sliding mode control. *Control engineering practice*, 18(10), 1121-1132.
- [7] Nguyen, D. T., Sørbo, A. H., & Sørensen, A. J. (2009). Modelling and control for dynamic positioned vessels in level ice. *IFAC Proceedings Volumes*, 42(18), 229-236.
- [8] Sørensen, A. J. (2011). A survey of dynamic positioning control systems. *Annual reviews in control*, 35(1), 123-136
- [9] Tannuri, E. A., Bravin, T. T., & Pesce, C. P. (2003, January). Dynamic positioning systems: comparison between wave filtering algorithms and their influence on performance. Available at: https://www.researchgate.net/publication/267603266_Dynamic_Positioning_Systems_Comparison_Between_Wave_Filtering_Algorithms_and_Their_Influence_on_Performance . Last accessed: September 2022
- [10] Skulstad, R., Li, G., Fossen, T. I., Vik, B., & Zhang, H. (2019). Dead reckoning of dynamically positioned ships: Using an efficient recurrent neural network. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 26(3), 39-51.

- [11] Ji, S. W., Choi, M. S., & Kim, Y. B. (2015). A study on position mooring system design for the vessel moored by mooring lines. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 20(6), 2824-2831.
- [12] Deng, F., Yang, H. L., & Wang, L. J. (2019). Adaptive unscented Kalman filter based estimation and filtering for dynamic positioning with model uncertainties. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 17(3), 667-678.
- [13] Welch, G., & Bishop, G. (1995). An introduction to the Kalman filter.
- [14] Cadet, O. (2003, September). Introduction to kalman filter and its use in dynamic positioning systems. In *Proceedings of Dynamic Positioning Conference* (pp. 16-17). Houston, USA.
- [15] Lin, X., Jiao, Y., & Zhao, D. (2018). An improved Gaussian filter for dynamic positioning ships with colored noises and random measurements loss. *IEEE Access*, 6, 6620-6629.
- [16] Deng, F., Yang, H. L., & Wang, L. J. (2019). Adaptive unscented Kalman filter based estimation and filtering for dynamic positioning with model uncertainties. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 17(3), 667-678.
- [17] Sarker, I. H. (2021). Machine learning: Algorithms, real-world applications and research directions. *SN Computer Science*, 2(3), 1-21.
- [18] Yan, R., Wang, S., & Psaraftis, H. N. (2021). Data analytics for fuel consumption management in maritime transportation: Status and perspectives. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 155, 102489.
- [19] Chakraborty, A., & Goswami, D. (2017). Prediction of slope stability using multiple linear regression (MLR) and artificial neural network (ANN). *Arabian Journal of Geosciences*, 10(17), 1-11.
- [20] Satir, T. (2014). Ballast water treatment systems: design, regulations, and selection under the choice varying priorities. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(18), 10686-10695.

- [21] Britannica, Deadweight Tonnage Definition. Available at: <https://www.britannica.com/technology/deadweight-tonnage>. Last Accessed: October 2022
- [22] Scikit-learn.org, R^2 score. Available at: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.r2_score.html. Last Accessed: October 2022.
- [23] Tay, Z. Y., Hadi, J., Chow, F., Loh, D. J., & Konovessis, D. (2021). Big data analytics and machine learning of harbour craft vessels to achieve fuel efficiency: a review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(12), 1351.
- [24] Zhu, Y., Zuo, Y., & Li, T. (2020, November). Predicting Ship Fuel Consumption Based on LSTM Neural Network. In 2020 7th International Conference on Information, Cybernetics, and Computational Social Systems (ICCSS) (pp. 310-313). IEEE.
- [25] Tritsarolis, A., Kontoulis, Y., & Theodoridis, Y. (2022). The Piraeus AIS dataset for large-scale maritime data analytics. *Data in brief*, 40, 107782.
- [26] Hauser, E. (2018). UNIX Time, UTC, and datetime: Jussivity, prolepsis, and incorrigibility in modern timekeeping. *Proceedings of the Association for Information Science and Technology*, 55(1), 161-170.
- [27] Wong, R. F., Rollins, C. M., & Minter, C. F. (2012, September). Recent updates to the WGS 84 reference frame. In *Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012)* (pp. 1164-1172).
- [28] Lawrence, M. G. (2005). The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(2), 225-234.
- [29] MongoDB Documentation, Document. Available at: <https://www.mongodb.com/docs/manual/core/document/>. Last Accessed: October 2022.
- [30] MongoDB Documentation, Indexes. Available at: <https://www.mongodb.com/docs/manual/indexes/>. Last Accessed: October 2022.

- [31] MongoDB Documentation, Aggregation Pipeline. Available at: <https://www.mongodb.com/docs/manual/core/aggregation-pipeline/>. Last Accessed: October 2022.
- [32] Pandas Documentation, Pandas Overview. Available at: https://pandas.pydata.org/docs/getting_started/overview.html. Last Accessed: November 2022
- [33] Li J, Cheng K, Wang S, Morstatter F, Trevino RP, Tang J, Liu H. Feature selection: A data perspective. *ACM computing surveys (CSUR)*. 2017 Dec 6;50(6):1-45.
- [34] Pandas Profiling Documentation, Project Description, Available at: <https://pypi.org/project/pandas-profiling/>. Last Accessed: November 2022.
- [35] Pandas Documentation, What kind of data does pandas handle? Available at: https://pandas.pydata.org/docs/getting_started/intro_tutorials/01_table_oriented.html. Last Accessed: November 2022.
- [36] Bonett, D. G., & Wright, T. A. (2000). Sample size requirements for estimating Pearson, Kendall and Spearman correlations. *Psychometrika*, 65(1), 23-28.
- [37] featurewiz library, Python. Available at: <https://pypi.org/project/featurewiz/>. Last Accessed: November 2022.
- [38] featurewiz documentation. Available at: <https://libraries.io/pypi/featurewiz>. Last Accessed: November 2022.
- [39] Jiang, X., Zhu, R., Li, S., & Ji, P. (2020). Co-embedding of nodes and edges with graph neural networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*.
- [40] Turc Castellà, F. X. (2020). Operations and maintenance costs for offshore wind farm. Analysis and strategies to reduce O&M costs (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- [41] VRPy Documentation. Available at: <https://vrpy.readthedocs.io/en/latest/>. Last Accessed: December 2022.
- [42] Hagberg, A., Swart, P., & S Chult, D. (2008). Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX (No. LA-UR-08-05495; LA-UR-08-5495). Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States).

- [43] Nikitas, G., Bhattacharya, S., & Vimalan, N. (2020). Wind energy. In Future Energy (pp. 331-355). Elsevier.
- [44] Barthelmie, R. J., Courtney, M. S., Højstrup, J., & Larsen, S. E. (1996). Meteorological aspects of offshore wind energy: Observations from the Vindeby wind farm. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 62(2-3), 191-211.
- [45] Ørsted A/S (2019). Making green energy affordable - How the offshore wind energy industry matured and what we can learn from it. Available at: <https://orsted.com/en/insights/white-papers/making-green-energy-affordable/1991-to-2001-the-first-offshore-wind-farms>. Last Accessed: December 2022
- [46] Cambridge Dictionary, Megawatt Definition. Available at: <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/megawatt>. Last Accessed: December 2022
- [47] Díaz, H., & Soares, C. G. (2020). Review of the current status, technology and future trends of offshore wind farms. *Ocean Engineering*, 209, 107381.
- [48] WindEurope.org. Offshore wind energy 2022 mid-year statistics. Available at: <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/offshore-wind-energy-2022-mid-year-statistics/#overview>. Last Accessed: December 2022
- [49] European Commission. 2030 Climate Target Plan. Available at: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-green-deal/2030-climate-target-plan_en#:~:text=With%20the%202030%20Climate%20Target,below%201990%20levels%20by%202030. . Last Accessed: December 2022
- [50] European Commission. Renewable Energy Targets. Available at: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-targets_en. Last Accessed: December 2022
- [51] WindEurope.org (2022). Wind energy in Europe: 2021 Statistics and the outlook for 2022-2026. Available at: <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2021-statistics-and-the-outlook-for-2022-2026/>. Last Accessed: December 2022

- [52] Merriam – Webster Dictionary. Gigawatt Definition. Available at: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/gigawatt>. Last Accessed: December 2022
- [53] U.S. Department of Energy – Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Advantages and Challenges of Wind Energy. Available at: <https://www.energy.gov/eere/wind/advantages-and-challenges-wind-energy#:~:text=When%20comparing%20the%20cost%20of,%2C%20coal%2C%20or%20nuclear%20facilities.> . Last Accessed: December 2022
- [54] Ørsted A/S. Hornsea 2, the world's largest windfarm, enters full operation. Available at: <https://orsted.com/en/media/newsroom/news/2022/08/20220831559011> . Last Accessed: December 2022
- [55] Kota, S., Bayne, S. B., & Nimmagadda, S. (2015). Offshore wind energy: a comparative analysis of UK, USA and India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 685-694.
- [56] Docker, <https://hub.docker.com> . Last accessed: December 2022