



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ  
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη ενεργειακής απόδοσης πλοίου:  
Κίνητρα και Προκλήσεις**

ΜΑΡΙΝΑ Ε. ΖΑΚΥΝΘΙΝΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: κ. Δημήτριος Ασκούνης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2019





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ  
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη ενεργειακής απόδοσης πλοίου:  
Κίνητρα και Προκλήσεις**

ΜΑΡΙΝΑ Ε. ΖΑΚΥΝΘΙΝΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: κ. Δημήτριος Ασκούνης, καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 7<sup>η</sup> Φεβρουαρίου 2019.

.....

.....

.....

Δημήτριος Ασκούνης

Ιωάννης Ψαρράς

Χρυσόστομος Δούκας

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Επίκουρος Καθηγητής  
Ε.Μ.Π.

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2019

.....

Μαρίνα Ε. Ζακυνθινού

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Μαρίνα Ε. Ζακυνθινού, 2019.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Περίληψη

Ο τομέας της Ναυτιλίας σήμερα ευθύνεται για περίπου το 2,5% των παγκοσμίων εκπομπών αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου. Αναφέρεται πως το 2007 με συνολικές παγκόσμιες εκπομπές στα 32 Gtones το μερίδιό της ήταν στο 3,5%, ενώ το 2015 με συνολικές παγκόσμιες εκπομπές στα 36 Gtones το μερίδιό της ήταν στο 2,6%, που υποδηλώνει σημαντική μείωση σε απόλυτα νούμερα. Ωστόσο, η βελτιστοποίηση της απόδοσης του πλοίου αποτελεί όλο και περισσότερο πλέον αδήριτη ανάγκη, τόσο για τη μείωση του λειτουργικού κόστους του στόλου όσο και για τη μείωση των εκπομπών αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Στις μέρες μας αναζητούνται διεθνώς πολιτικές αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής και μετάβασης από την «εποχή του άνθρακα» σε μια βιώσιμη ενεργειακή πραγματικότητα. Η αξιοποίηση μεγάλου όγκου δεδομένων, που προέρχονται από διάφορες πηγές πληροφόρησης και ποικίλλουν στην ταχύτητα παραγωγής τους και την αξιοπιστία τους, τα ευρέως αποκαλούμενα «Δεδομένα Μεγάλης Κλίμακας», μπορεί αδιαμφισβήτητα να αποτελέσει μέρος της λύσης για τη βελτίωση της ενεργειακής διαχείρισης των πλοίων, και πολλών άλλων τομέων, γενικότερα. Σήμερα, όπου η τοποθέτηση συστημάτων παρακολούθησης και μετρήσεων πραγματικού χρόνου επάνω στα πλοία γίνεται όλο και πιο διαδεδομένη, η εκμετάλλευση δεδομένων μεγάλης κλίμακας στο θαλάσσιο περιβάλλον και τη ναυτιλιακή βιομηχανία θα μπορούσε να οδηγήσει σε πολύ χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με το ανθρακικό αποτύπωμα της ποντοπόρου ναυτιλίας. Έτσι, η ανάλυση της ενεργειακής απόδοσης στα πλοία αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε μια περίοδο που ο έλεγχος της κλιματικής αλλαγής από την πλευρά της ναυτιλίας καθώς και η εξοικονόμηση καυσίμου είναι θέματα αιχμής.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση των συσχετίσεων ανάμεσα σε διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση των πλοίων, τόσο μέσα από την περιγραφή του θεωρητικού υπόβαθρου όσο και μέσω πρακτικής ανάλυσης ενός συνόλου δεδομένων που προέρχονται από την πραγματική λειτουργία ενός στόλου οχτώ (8) αδελφών φορτηγών πλοίων. Μέσα από μία σειρά συνεντεύξεων που διενεργήθηκαν με τους ειδικούς στον τομέα της Ναυτιλίας, έγινε μία προσπάθεια γεφύρωσης της θεωρίας με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από πραγματικές εφαρμογές.

**Λέξεις Κλειδιά:** Ναυτιλία, Δεδομένα μεγάλης κλίμακας, Κατανάλωση καυσίμου, Απόδοση πλοίου, Μηχανική μάθηση

## **Abstract**

Today, the Maritime sector is responsible for about 2.5% of global greenhouse gas emissions. It is reported that in 2007 with total global emissions of 32 Gtones its share was 3.5%, while in 2015 with total global emissions of 36 Gtones its share was 2.6%, indicating a significant decrease in absolute numbers. However, optimizing ship's performance is nowadays an urgent need both to reduce fleet operating costs as well as to reduce greenhouse gas emissions.

Nowadays, policies to tackle climate change and transition from the “coal age” to a sustainable energy reality are being sought internationally. The exploitation of large-scale data, derived from various sources of information and varying in production velocity and veracity, the so-called “Big Data”, can undoubtedly be part of the solution for improving the energy management of our ships and many other sectors in general. Today, where the deployment of real-time monitoring and measurement systems on board is becoming more widespread, the exploitation of large scale data in the marine environment and the shipping industry could lead to very useful conclusions about the carbon footprint of seagoing shipping. Thus, the analysis of energy efficiency in ships is of particular interest at a time when maritime climate change control and fuel economy are cutting edge issues.

The aim of the present study is to investigate the correlations between various factors affecting the energy performance of ships, both through the description of the theoretical background as well as through a practical analysis of a set of data derived from the actual operation of a fleet of eight (8) cargo ships. Through a series of interviews conducted with shipping specialists, an attempt was made to bridge the theory with the results from real-world applications.

**Keywords:** Shipping, Big data, Fuel consumption, Energy efficiency, Machine learning

## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον τομέα Ηλεκτρικών και Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κατά τη διάρκεια του τελευταίου εξαμήνου φοίτησης.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Δημήτριο Ασκούνη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση αυτής της διπλωματικής εργασίας και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα θέμα τόσο ενδιαφέρον και επίκαιρο.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω, επίσης, στον επιβλέποντα την παρούσα διπλωματική, τον κ. Σπύρο Μουζακίτη, Διδάκτορα Ε.Μ.Π., για την πολύτιμη επιστημονική βοήθεια που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια της συγγραφικής διαδικασίας. Τόσο η άρτια επιστημονική του κατάρτιση όσο και το ήθος και η καλοσύνη του συνέβαλαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Οικογένεια Αγγελικούση και όλους τους φίλους, συναδέλφους και συνεργάτες του Ομίλου για τις συμβουλές και την επιστημονική καθοδήγηση που μου προσέφεραν προκειμένου να ολοκληρωθεί η συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Οι γνώσεις, η εμπειρία τους και οι καίριες υποδείξεις τους προσέδωσαν ανεκτίμητη βοήθεια στην επίτευξη ενός πονήματος που βασίζεται σε ένα στέρεο θεωρητικό υπόβαθρο, πλαισιωμένο από την εμπειρία που πηγάζει από το πραγματικό πεδίο λειτουργίας ενός πλοίου. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω, επίσης, προς τον κ. Γρηγόρη Κούβαρη, Α' Μηχανικό Ε. Ν., για την αγάπη και την υπομονή που μου έδειξε στην πρώτη μου επαφή με τον τομέα της Ναυτιλίας, ανοίγοντάς μου νέους δρόμους γεμάτους γνώσεις και εμπειρίες.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τη βαθιά ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένειά μου για την ηθική στήριξη, την ανοχή και την αμέριστη συμπαράστασή τους, χωρίς πίεση και απαιτήσεις. Η ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας δεν θα ήταν δυνατή χωρίς τις δικές τους στερήσεις όλα τα προηγούμενα χρόνια και τους ευχαριστώ θερμά για αυτό.

*Μαρίνα Ε. Ζακυνθινού*

Φεβρουάριος 2019

# Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις



## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

*Στην Σταυριάννα,*

*γιατί με κάθε της χαμόγελο  
κάνει κάθε μου προσπάθεια λιγότερο δύσκολη*

# Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

## Περιεχόμενα

<b>Περίληψη</b> .....	<b>i</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>ii</b>
<b>Πρόλογος</b> .....	<b>iii</b>
<b>1 Εισαγωγή</b> .....	<b>9</b>
1.1 Αντικείμενο – Σκοπός .....	9
1.2 Μεθοδολογία .....	10
1.3 Οδηγός επόμενων κεφαλαίων .....	12
<b>2 Ενεργειακή Αποδοτικότητα Πλοίου</b> .....	<b>15</b>
2.1 Επισκόπηση.....	15
2.1.1 Οικονομικά οφέλη .....	15
2.1.2 Περιβαλλοντικοί κανονισμοί .....	16
2.2 Επίδραση παραγόντων στην κατανάλωση καυσίμου.....	17
2.2.1 Παράγοντες άμεσης εξάρτησης .....	19
2.2.2 Παράγοντες έμμεσης εξάρτησης .....	34
2.3 Ανασκόπηση αντίστοιχων μελετών .....	35
2.4 Ανασκόπηση συστημάτων / εργαλείων .....	40
2.5 Καταγραφή καλών πρακτικών .....	43
2.6 Προκλήσεις για περαιτέρω έρευνα .....	46
<b>3 Δεδομένα, μετρήσεις και ανάλυση</b> .....	<b>49</b>
3.1 Δεδομένα μεγάλης κλίμακας.....	49
3.2 Συλλογή δεδομένων .....	52
3.2.1 Μέθοδοι μέτρησης.....	54

## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

3.2.2	Ακρίβεια μετρήσεων.....	55
3.3	Κριτήρια αξιολόγησης .....	58
<b>4</b>	<b>Case Study – Μελέτη απόδοσης στόλου .....</b>	<b>61</b>
4.1	Επισκόπηση του προβλήματος.....	61
4.2	Εξεταζόμενα πλοία.....	61
4.3	Διαθέσιμα δεδομένα.....	63
4.4	Φιλτράρισμα δεδομένων .....	66
4.5	Διόρθωση της ταχύτητας λόγω παρουσίας θαλάσσιων ρευμάτων .....	67
4.6	Ανάλυση δεδομένων .....	68
4.7	Παραδοχές.....	77
<b>5</b>	<b>Συμπεράσματα.....</b>	<b>79</b>
5.1	Κίνητρα και προκλήσεις.....	79
5.2	Μελλοντικές επεκτάσεις .....	83
<b>6</b>	<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>87</b>

## 1 Εισαγωγή

### 1.1 Αντικείμενο – Σκοπός

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη των παραγόντων που επηρεάζουν την κατανάλωση του καυσίμου ενός πλοίου κατά τη λειτουργία του, συνθέτοντας τις πληροφορίες που παρέχονται από τη βιβλιογραφία, ως θεωρητικό υπόβαθρο, την εμπειρία από τους επαίοντες στον τομέα της Ναυτιλίας, αλλά και την πρακτική εφαρμογή ανάλυσης ενός συνόλου δεδομένων που προέρχονται από την πραγματική λειτουργία ενός στόλου οχτώ (8) αδελφών φορτηγών πλοίων. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να αναδείξει τη σπουδαιότητα και τα αναμενόμενα οφέλη που προκύπτουν από την ανάλυση δεδομένων μεγάλης κλίμακας σχετικών με την ενεργειακή απόδοση ενός πλοίου, τις προκλήσεις που καλείται κανείς να αντιμετωπίσει καθώς και τις δυνατότητες που μπορούν να προσφέρουν οι εφαρμογές μηχανικής μάθησης, στο πλαίσιο της αειφόρου ανάπτυξης, στον τομέα της Ναυτιλίας.

Η συμβολή του ελέγχου της ενεργειακής απόδοσης ενός πλοίου είναι πολλαπλή: αρχικά, η παρακολούθηση της κατανάλωσης καυσίμου μπορεί να αποδώσει σημαντικά οικονομικά οφέλη, τα οποία συμβάλλουν στη μείωση των λειτουργικών εξόδων της διαχειρίστριας εταιρείας και συνεπάγεται ταυτόχρονη αύξηση της ανταγωνιστικότητας του στόλου της. Επιπλέον, βοηθά στη βελτίωση της λειτουργίας του πλοίου, μέσω της εξασφάλισης της βέλτιστης λειτουργίας των μηχανημάτων του και της ασφαλούς δρομολόγησής του μέσω της καταλληλότερης διαδρομής, λαμβάνοντας υπόψη διάφορες παραμέτρους που επηρεάζουν την κατανάλωση του καυσίμου, όπως οι καιρικές συνθήκες και τα θαλάσσια ρεύματα. Ταυτόχρονα, η μείωση της κατανάλωσης του καυσίμου συνεπάγεται μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και άλλων ρυπογόνων εκπομπών, με αποτέλεσμα την προστασία του περιβάλλοντος.

Η συμβολή της παρούσας εργασίας έγκειται στο γεγονός ότι αποτελεί έναν σύντομο –αλλά πλήρη – οδηγό γύρω από τους παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση καυσίμου στα πλοία, ξεκινώντας από ένα θεωρητικό υπόβαθρο και καταλήγοντας στην ανάλυση δεδομένων που προέρχονται από τον «πραγματικό κόσμο». Μέσα από την αξιοποίηση της εμπειρίας των ειδικών στον τομέα της Ναυτιλίας δόθηκε η ευκαιρία να γεφυρωθεί η θεωρία με την πράξη, ούτως ώστε να αναδειχθούν τα οφέλη αλλά και οι προκλήσεις που καλείται κανείς να αντιμετωπίσει κατά την ανάλυση δεδομένων μεγάλης κλίμακας σχετικά με την κατανάλωση καυσίμου στα πλοία. Ειδικά σήμερα, όπου ο έλεγχος της κλιματικής αλλαγής αποτελεί προτεραιότητα για όλη την ανθρωπότητα και συνεπώς και το θέμα της

κατανάλωσης ενέργειας και της συνεπαγόμενης παραγωγής καυσαερίων του θερμοκηπίου από τα πλοία κατέχει δεσπόζουσα θέση στην ημερήσια διάταξη της τρέχουσας ναυτιλιακής πολιτικής, η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του πλοίου μπορεί να αποδώσει πολλαπλά οικονομικά, λειτουργικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Έτσι, λοιπόν, τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελούν τη βάση για την ανάλυση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων και μπορούν να αξιοποιηθούν με αρκετές προεκτάσεις στο πεδίο της έρευνας της ενεργειακής διαχείρισης στον τομέα της Ναυτιλίας.

## 1.2 Μεθοδολογία

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας συνοψίζεται σε 4 διακριτές φάσεις:

### **Φάση 1<sup>η</sup>: Μελέτη βιβλιογραφικών αναφορών σχετικά με τους παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση του καυσίμου ενός πλοίου**

Κατά τη διάρκεια της 1<sup>ης</sup> φάσης, έγινε προσπάθεια να συγκεντρωθούν πληροφορίες από διάφορες βιβλιογραφικές πηγές προκειμένου να εδραιωθεί ένα συνοπτικό αλλά πλήρες θεωρητικό υπόβαθρο για περαιτέρω έρευνα. Με τη βοήθεια του Διαδικτύου κατέστη δυνατή η καταγραφή των βασικών παραγόντων που επιδρούν στην κατανάλωση του καυσίμου και παρουσιάζεται εν συντομία ο τρόπος συσχέτισής τους.

### **Φάση 2<sup>η</sup>: Στατιστική ανάλυση ενός συνόλου δεδομένων που προέρχονται από την πραγματική λειτουργία ενός στόλου 8 αδελφών φορτηγών πλοίων, για την ποσοτική αξιολόγηση των συμπερασμάτων της βιβλιογραφίας**

Μέσα από την αξιοποίηση των πραγματικών ιστορικών δεδομένων και τη θεωρητική και πρακτική μελέτη της επίδρασής τους στην κατανάλωση του καυσίμου, κατέστη εφικτή η αποκάλυψη των σχέσεων που συνδέουν τις μεταβλητές εισόδου (ανεξάρτητες μεταβλητές) και εξόδου (εξαρτημένες μεταβλητές, ήτοι η τελική κατανάλωση καυσίμου).

### **Φάση 3<sup>η</sup>: Ποιοτική ανάλυση των συμπερασμάτων της Φάσης 1 και 2, αξιοποιώντας την εμπειρία από τους ειδήμονες στον τομέα της Ναυτιλίας**

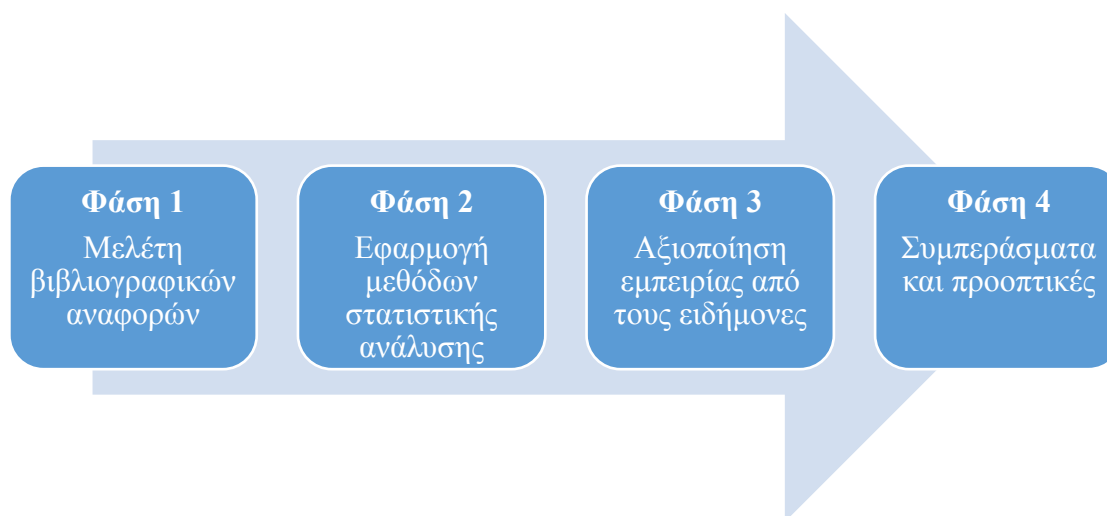
## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

Στη διάρκεια αυτής της φάσης, αντλήθηκαν χρήσιμες πληροφορίες από τους ειδήμονες που ασχολούνται επί σειρά ετών με τη μελέτη της κατανάλωσης του καυσίμου σε πραγματικά σενάρια λειτουργίας διαφόρων τύπων πλοίων, και συγκεκριμένα σε φορτηγά, δεξαμενόπλοια και πλοία τύπου LNG. Δεδομένου ότι η εμπειρία είναι πολύ δύσκολο – αν όχι, πρακτικά αδύνατο – να δομηθεί και να αποτυπωθεί συστηματοποιημένα στη βιβλιογραφία, η συνεισφορά των ειδικών του χώρου στον σχολιασμό και την εξαγωγή των συμπερασμάτων που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη υπήρξε καθοριστικής σημασίας.

### Φάση 4<sup>η</sup>: Συμπεράσματα και προοπτικές

Κατά τη διάρκεια της τελευταίας φάσης της μελέτης κατεγράφησαν τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την προηγούμενη θεωρητική και πρακτική μελέτη και εξετάστηκαν οι προοπτικές που αναδύονται από την παρούσα εργασία.

Εποπτικά, τα προαναφερθέντα 4 στάδια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας απεικονίζονται στο ακόλουθο διάγραμμα:



Κατά συνέπεια, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και περιγράφεται ανωτέρω, επέτρεψε τόσο την επιβεβαίωση των **θεωρητικών γνώσεων** που προέρχονται από τη μελέτη των βιβλιογραφικών αναφορών αλλά παράλληλα ανέδειξε και τα προβλήματα που συναντά κανείς κατά τη μελέτη της **πραγματικής κατανάλωσης** του καυσίμου ενός πλοίου σε κανονική λειτουργία. Μόνο μέσα από τη ρεαλιστική απόδοση του προβλήματος είναι εφικτή η προσέγγιση εφικτών, χρήσιμων και αποτελεσματικών λύσεων.

## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

Το δείγμα των πραγματικών μετρήσεων που ελήφθησαν είναι αρκετά ευρύ, τόσο από άποψη των διαφόρων παραμέτρων που συσχετίζονται (μετά την κανονικοποίησή τους σε ένα κοινό επίπεδο αναφοράς) όσο και από την άποψη του όγκου τους, μιας και τα δεδομένα αυτά εξήχθησαν από το 2011 έως την περίοδο συγγραφής της παρούσας εργασίας, δηλαδή σε χρονικό διάστημα επτά (7) ετών.

Μετά την εξαγωγή των δεδομένων από την πλατφόρμα επικοινωνίας ανάμεσα στο πλοίο και τον πλοιοκτήτη (“Danaos Ship Management Suite”), έγινε η επεξεργασία τους, μέσω της εφαρμογής κατάλληλων φίλτρων και κανονικοποιήσεων ώστε να μπορούν να συσχετιστούν οι διάφορες παράμετροι μεταξύ τους και να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τους τελικούς χρήστες.

Η αξιολόγηση της απόδοσης του πλοίου έγινε σε τρεις άξονες:

- 1) Μέσω της σύγκρισης της απόδοσής του κατά τη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας του, **πριν και μετά** από διάφορα χρονικά σημεία όπου έλαβαν χώρα σημαντικές αλλαγές (π.χ. δεξαμενισμοί, καθαρισμοί κύτους και έλικας, τυχόν μεγάλοι χρόνοι παραμονής σε λιμάνι κ.ά.) κατέστη δυνατή η αποτύπωση της συνολικής απόδοσης του πλοίου για το σύνολο των ταξιδιών του μέχρι σήμερα.
- 2) Μέσω της σύγκρισης της απόδοσής του με άλλα **αδελφά πλοία**, δηλαδή πλοία ίσων διαστάσεων, ίδιων ναυπηγικών γραμμών, προσαρτημάτων και συστημάτων πρόωσης, τα οποία έχουν κατασκευαστεί σειριακά από το ίδιο ναυπηγείο.
- 3) Μέσω της σύγκρισης των πραγματικών δεδομένων που παράγονται από τις μετρήσεις επάνω στο πλοίο κατά τη λειτουργία του με τις αντίστοιχες προσδοκώμενες τιμές που είχαν προκύψει κατά τη διάρκεια των **δοκιμών παραλαβής**<sup>1</sup> (sea trials), οι οποίες λαμβάνουν χώρα κατά την κατασκευή του πλοίου και λίγο πριν την παράδοσή του από το ναυπηγείο στον πλοιοκτήτη.

### 1.3 Οδηγός επόμενων κεφαλαίων

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 3 κύρια μέρη:

---

<sup>1</sup> Τα δεδομένα που εξάγονται κατά τις δοκιμές παραλαβής (sea trials) αποτελούν μία σταθερή βάση αναφοράς για το πλοίο και το χαρακτηρίζουν καθ’ όλη τη διάρκεια ζωής του, εκτός και εάν το κύτος, η έλικα ή το βασικό σύστημα πρόωσης του πλοίου υποστούν σημαντικές μεταβολές. Αυτή η βάση αναφοράς αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο στην περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων.



## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

- Στο πρώτο μέρος, περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο γύρω από τη μελέτη της κατανάλωσης καυσίμου ενός πλοίου.
- Στο δεύτερο μέρος, αναλύεται ένα σύνολο πραγματικών δεδομένων με τη χρήση μεθόδων στατιστικής ανάλυσης.
- Στο  τρίτο μέρος, παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν τόσο από τη θεωρητική όσο και από την πρακτική μελέτη του ζητήματος και παρατίθενται τα εξαγόμενα συμπεράσματα, μέσα από τη σκοπιά των ειδικών στον τομέα της Ναυτιλίας. Η εργασία ολοκληρώνεται με την ανάδειξη των δυσκολιών που καλείται κανείς να αντιμετωπίσει κατά την ανάλυση της κατανάλωσης του πλοίου και τον προσδιορισμό των μελλοντικών προκλήσεων που θα μπορούσαν να μελετηθούν, έχοντας ως αφετηρία την παρούσα εργασία.

### Πιο αναλυτικά:

Το παρόν **πρώτο κεφάλαιο** αποτελεί την εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας, όπου παρατίθενται ο σκοπός και το αντικείμενο μελέτης που πραγματεύεται. Επίσης, γίνεται παρουσίαση των φάσεων υλοποίησης και η δομή του τόμου.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** παρουσιάζεται η οικονομική και περιβαλλοντική διάσταση του ζητήματος της κατανάλωσης καυσίμου και επισημαίνεται η αναγκαιότητα της παρακολούθησης της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου, όπως ορίζεται από το πρόσφατο νομοθετικό πλαίσιο και τις προειδοποιήσεις των ειδικών σχετικά με την ανάγκη λήψης δράσεων για την αντιμετώπιση της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Για αυτόν τον σκοπό, τίθενται τα θεμέλια της θεωρητικής γνώσης που πρέπει να κατέχει κάποιος που ασχολείται με τη μελέτη της ενεργειακής απόδοσης στα πλοία και προσδιορίζονται οι συσχετίσεις των διαφόρων παραγόντων με την τελική κατανάλωση του καυσίμου. Επίσης, γίνεται μία ανασκόπηση της μέχρι τώρα έρευνας σε αυτό το θέμα και παρατίθεται μία ενδεικτική λίστα των συνηθέστερων εργαλείων παρακολούθησης της απόδοσης ενός πλοίου σήμερα. Επιπλέον, γίνεται μια καταγραφή «καλών πρακτικών» που εφαρμόζονται συχνά στις μέρες μας από τους ειδικούς στον τομέα της Ναυτιλίας με αποδεδειγμένα οφέλη στην εξοικονόμηση ενέργειας στα πλοία.

Στο  **τρίτο κεφάλαιο** γίνεται εισαγωγή στην έννοια των δεδομένων μεγάλης κλίμακας. Περιγράφεται η διαδικασία συλλογής των δεδομένων και τα προβλήματα σχετικά με την ακρίβεια των μετρήσεων. Επίσης, γίνεται μία εισαγωγή στα κριτήρια αξιολόγησης βάσει των οποίων θα γίνει η ανάλυση της απόδοσης ενός συνόλου πραγματικών ταξιδιών του επόμενου κεφαλαίου.

## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

Το **τέταρτο κεφάλαιο** αφορά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή στατιστικής ανάλυσης που προαναφέρθηκε σε ένα σύνολο πραγματικών δεδομένων από τα ταξίδια ενός στόλου 8 αδελφών πλοίων. Περιγράφονται οι σχέσεις που απορρέουν ανάμεσα στις ανεξάρτητες μεταβλητές (π.χ. ταχύτητα πλοίου, ένταση ανέμου, χρόνος από τον τελευταίο καθαρισμό κύτους) με την κατανάλωση του καυσίμου (εξαρτημένη μεταβλητή), επιβεβαιώνονται οι θεωρητικά αναμενόμενες αλληλεξαρτήσεις και διερευνώνται τυχόν αποκλίσεις.

Τέλος, στο **πέμπτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη και γίνεται μία γενική αποτίμηση σχετικά με τις δυσκολίες και τα οφέλη της ενεργειακής διαχείρισης ενός πλοίου. Η εργασία ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των δυνατοτήτων επέκτασης της παρούσας μελέτης.

## 2 Ενεργειακή Αποδοτικότητα Πλοίου

### 2.1 Επισκόπηση

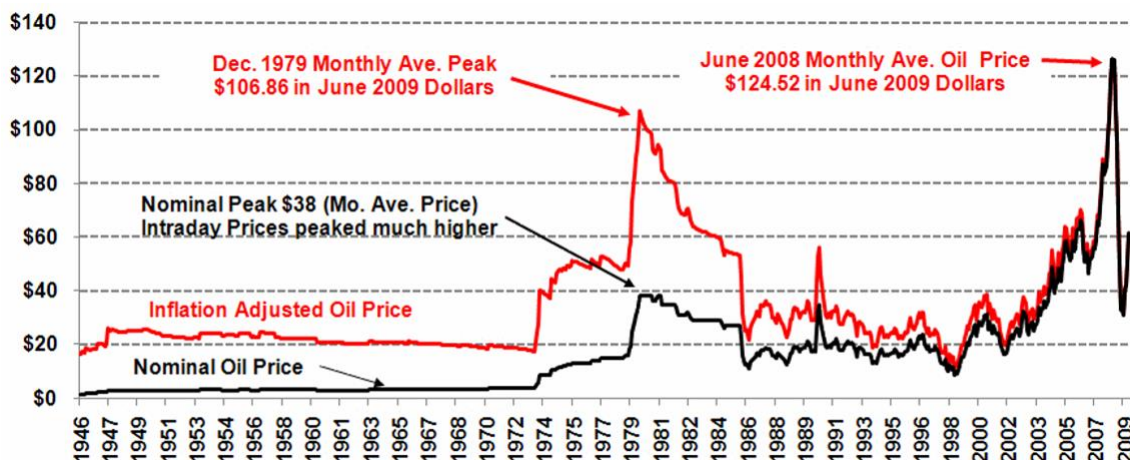
Η ενεργειακή αποδοτικότητα ενός πλοίου είναι ένα σύνθετο πρόβλημα και μπορεί να το προσεγγίσει κανείς από διάφορες σκοπιές και σε ποικίλα επίπεδα.

Το ενδιαφέρον γύρω από τον έλεγχο της ενεργειακής αποδοτικότητας του πλοίου σχετίζεται με οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και τεχνικούς παράγοντες. Η επιδίωξη της καλύτερης κατανόησης της λειτουργικής απόδοσης ενός πλοίου είναι άμεσα συνδεδεμένη με το κόστος των καυσίμων και τη ρύπανση του περιβάλλοντος. Αρκετά συστήματα παρακολούθησης της ενεργειακής αποδοτικότητας του πλοίου, επιχειρησιακές στρατηγικές, συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας και έρευνα έγιναν στη δεκαετία του 1980 μετά την ύφεση της οικονομίας των πετρελαιοειδών στα τέλη της δεκαετίας του 1970. Στο διάστημα των τελευταίων 5 ετών, το ενδιαφέρον γύρω από την εξοικονόμηση και τον έλεγχο της ενέργειας έχει επανέλθει στο προσκήνιο εξαιτίας των υψηλών τιμών του πετρελαίου και την *επιτακτική ανάγκη ανάληψης επείγουσας δράσης* για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής [1].

Στις επόμενες παραγράφους γίνεται μία σύντομη αναφορά σε σημαντικά θέματα που αφορούν την ενεργειακή αποδοτικότητα ενός πλοίου, μιας και η πλήρης γνώση και κατανόησή τους αποτελούν βάση και προϋπόθεση για την ορθή ανάλυση και αξιολόγηση των δεδομένων που θα ακολουθήσει.

#### 2.1.1 Οικονομικά οφέλη

Η επόμενη εικόνα αναπαριστά τις τιμές του αργού πετρελαίου από το 1946 έως το 2009. Οι αιτίες της πετρελαϊκής κρίσης της προηγούμενης δεκαετίας μπορούν να αποδοθούν στην ταχεία αύξηση της ζήτησης, τη μείωση της παραγωγής, την πολιτική αστάθεια, φαινόμενα κερδοσκοπίας κ.ά. Οι ηγέτες της πετρελαϊκής βιομηχανίας διαπιστώνουν ότι η εύρεση νέων πηγών πετρελαίου γίνεται ολοένα και δυσκολότερη και το κόστος για την άντλησή του διαρκώς αυξάνει. Αξίζει να σημειωθεί ότι το 2002, καταναλώθηκε παγκοσμίως τετραπλάσια ποσότητα πετρελαίου από αυτήν που βρέθηκε από νέες πηγές.



Εικόνα 2.1: Ονομαστική και πραγματική τιμή πετρελαίου 1946-2009 [2]

Ως απόρροια των ταχέως αυξανόμενων τιμών του πετρελαίου, το κόστος των καυσίμων στα πλοία έχει ανέλθει από 40% έως 60% του συνολικού λειτουργικού τους κόστους τα τελευταία χρόνια. Για την εξοικονόμηση καυσίμων, συχνά επιλέγεται λειτουργία της μηχανής σε χαμηλές ταχύτητες, όπου και όποτε αυτό είναι δυνατόν, κάτι το οποίο επιπλέον οδηγεί σε υπο-λειτουργία του πλοίου και επιπρόσθετη φθορά της μηχανής. Για αυτόν τον λόγο, οι πλοιοκτήτες πάντοτε επιδιώκουν τη λειτουργία των πλοίων τους υπό τις βέλτιστες τεχνικές και λειτουργικές συνθήκες. [2] Η επίτευξη της βέλτιστης λειτουργίας του πλοίου από άποψη ενεργειακής απόδοσης είναι εφικτή μόνο μέσα από την παρακολούθηση της κατανάλωσης του καυσίμου ακολουθώντας με συνέπεια μία δομημένη και σαφώς ορισμένη μεθοδολογία.

### 2.1.2 Περιβαλλοντικοί κανονισμοί

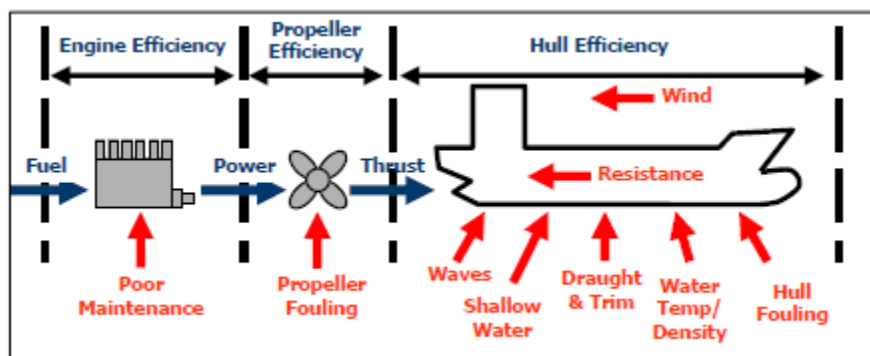
Ο κανονισμός για τη θαλάσσια κυκλοφορία “Monitoring, Reporting, Verification” – MRV που εγκρίθηκε τον Απρίλιο του 2015 δημιουργεί ένα πανευρωπαϊκό νομικό πλαίσιο για την παρακολούθηση, την αναφορά και την επικινδυνότητα των εκπομπών CO<sub>2</sub> και άλλων σχετικών πληροφοριών από τις θαλάσσιες μεταφορές. Σύμφωνα με τον κανονισμό, πλοία μεγαλύτερα από 5.000 τόνους και άνω, ανεξάρτητα από το πού είναι νηολογημένα το πλοίο ή η εταιρεία, τα οποία εκτελούν δρομολόγια σε λιμένες του Ευρωπαϊκού Οικονομικού Χώρου – ΕΟΧ (Ευρωπαϊκή Ένωση, Ισλανδία και Νορβηγία), από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2018 απαιτείται να εφαρμόζουν συστήματα και διαδικασίες για την παρακολούθηση των εκπομπών CO<sub>2</sub> που προκαλούν καθώς και άλλες πληροφορίες σχετικά με τις μετακινήσεις

προς, από και μεταξύ λιμένων του ΕΟΧ, καθώς και κατά τη διάρκεια της παραμονής τους σε λιμένες εντός ΕΟΧ. Οι εταιρείες που έχουν αναλάβει την ευθύνη για τη συμμόρφωση των πλοίων που επισκέπτονται λιμένες του ΕΟΧ με τον κανονισμό MRV θα πρέπει [3]:

- Έως τις 31 Αυγούστου 2017 να είχαν υποβάλει στους ελεγκτές ένα σχέδιο παρακολούθησης για κάθε πλοίο άνω των 5.000 GT που επισκέπτεται λιμένες του ΕΟΧ, αναφέροντας τη μέθοδο που επιλέχθηκε για την παρακολούθηση και αναφορά των εκπομπών CO<sub>2</sub> και άλλων σχετικών πληροφοριών. Οι εταιρείες οφείλουν να αναπτύξουν ένα σχέδιο παρακολούθησης σύμφωνα με το άρθρο 6 του κανονισμού, χρησιμοποιώντας τυποποιημένα ηλεκτρονικά πρότυπα.
- Από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2018, οφείλουν να παρακολουθούν και να αναφέρουν σε διαπιστευμένο ναυτιλιακό ελεγκτή MRV, δεδομένα σχετικά με την κατανάλωση καυσίμων και άλλα όπως η απόσταση, ο χρόνος στη θάλασσα και το μεταφερόμενο φορτίο, έτσι ώστε να προσδιορίζεται η μέση ενεργειακή απόδοση των πλοίων.
- Από το 2019, έως τις 30 Απριλίου κάθε έτους, να υποβάλλουν ηλεκτρονικά στην Επιτροπή ικανοποιητικά ελεγμένες εκθέσεις εκπομπών για κάθε ένα από τα εν λόγω πλοία.
- Από το 2019, μέχρι τις 30 Ιουνίου κάθε έτους, να διασφαλιστεί ότι όλα τα πλοία που έχουν εκτελέσει δραστηριότητες κατά την προηγούμενη περίοδο αναφοράς και επισκέπτονται λιμένες εντός ΕΟΧ φέρουν επί του πλοίου έγγραφο συμμόρφωσης που εκδίδεται από διαπιστευμένο ναυτιλιακό ελεγκτή MRV. Αυτό ενδέχεται να υπόκειται σε επιθεωρήσεις από τις αρχές των κρατών μελών (κανονισμός της ΕΕ 2015).

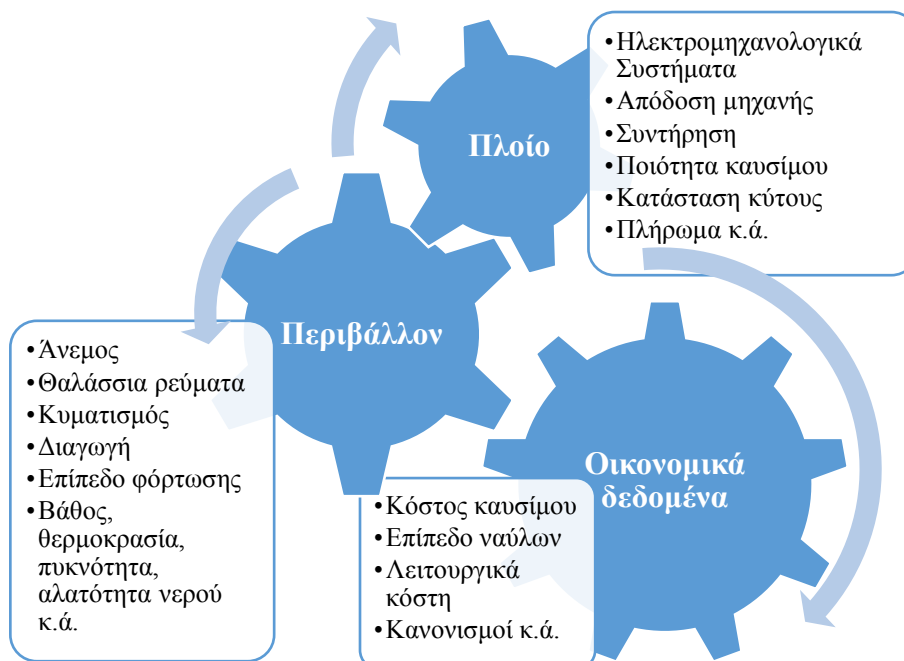
## 2.2 Επίδραση παραγόντων στην κατανάλωση καυσίμου

Σε μια αγορά όπου τα περιθώρια μείωσης του λειτουργικού κόστους συρρικνώνονται συνεχώς, είναι προφανής η επιδίωξη κάθε πλοιοκτήτη να αποσκοπεί στη λειτουργία του στόλου του με τη βέλτιστη δυνατή απόδοση, αναφορικά με την κατανάλωση του καυσίμου. Κατά τη λειτουργία ενός πλοίου, το σύστημα αντιρρύπανσης του κύτους γίνεται ολοένα και λιγότερο αποδοτικό. Η ρύπανση του κύτους αυξάνει την αντίσταση τριβής. Η συνολική αντίσταση, οφειλόμενη στη ρύπανση του κύτους του πλοίου, μπορεί να αυξηθεί σημαντικά κατά το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο δεξαμενισμών, με μία μέση τυπική μείωση ταχύτητας περίπου 2-4% ετησίως. Ο αυξανόμενος προβληματισμός σχετικά με περιβαλλοντικούς κανονισμούς και τα μικρότερα περιθώρια κέρδους στον τομέα της Ναυτιλίας ανάγουν τον έλεγχο της απόδοσης του πλοίου σημείο-κλειδί στις θαλάσσιες μεταφορές.



Εικόνα 2.2: Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του πλοίου [4]

Η σύγχρονη τάση επιβάλλει την ανάλυση **δεδομένων μεγάλης κλίμακας**. Με τον όρο αυτόν νοείται ο τεράστιος όγκος δεδομένων που είναι διαθέσιμος προς ανάλυση από τον επιβλέποντα του πλοίου, τα οποία προέρχονται από διάφορα συστήματα μέτρησης είτε επί του πλοίου είτε από διαφορετικές πηγές, έχουν μεγάλο βαθμό εύρους και πολυπλοκότητας, η πληροφορία αυτή παράγεται με πολύ μεγάλο ρυθμό και ο βαθμός αξιοπιστίας των δεδομένων που συλλέγονται προς ανάλυση ποικίλλει.



Εικόνα 2.3: Το ευρύτερο περιβάλλον ενός πλοίου και αλληλεξαρτήσεις

Για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, απαιτείται αφενός η εγκατάσταση μόνιμου εξοπλισμού επάνω στο πλοίο για την συλλογή δεδομένων αφετέρου ένα σύστημα ανάλυσής τους από τη στεριά. [5]

### 2.2.1 Παράγοντες άμεσης εξάρτησης

Αρχικά, ένας πολύ σημαντικός παράγοντας της ενεργειακής αποδοτικότητας ενός πλοίου είναι οι **υδροδυναμικές του ιδιότητες**. Για την βελτιστοποίηση ενός πλοίου από υδροδυναμικής άποψης, υπάρχουν τρία βήματα που πρέπει να ακολουθούνται:

- Βελτιστοποίηση κύτους
- Βελτιστοποίηση έλικας
- Διάδραση κύτους-έλικας

Το κύτος και οι διαστάσεις του βελτιστοποιούνται προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι δύο βασικές συνιστώσες της αντίστασης, συγκεκριμένα η **αντίσταση τριβής** (frictional resistance) και η **αντίσταση κυματισμού** (wave resistance).

## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

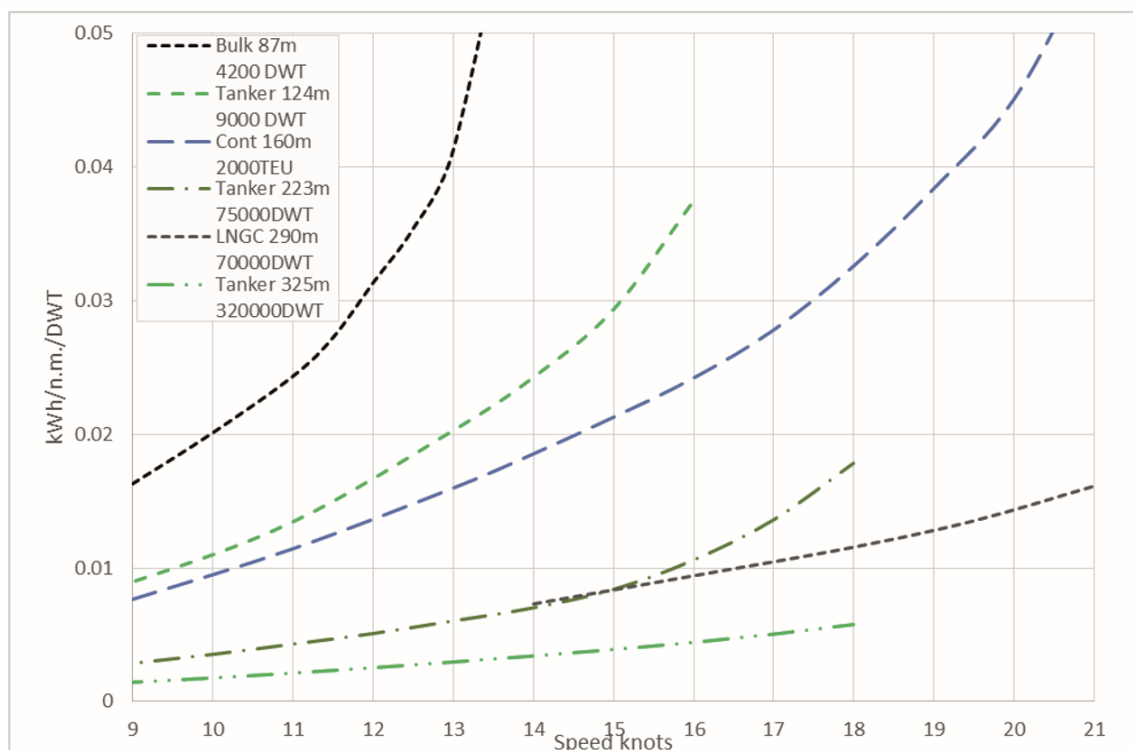
Η **αντίσταση τριβής** προκαλείται από τις κινήσεις του νερού κατά μήκος του κύτους, όπου η πυκνότητα του νερού δημιουργεί αντίσταση τριβής στα πλευρά του πλοίου. Η αντίσταση τριβής είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας, κατά συνέπεια ο διπλασιασμός της ταχύτητας θα επιφέρει τετραπλασιασμό της αντίστασης (και πολλαπλασιασμό της απαιτούμενης ισχύος επί 8).

Η αντίσταση τριβής εξαρτάται επίσης από την **τραχύτητα** της επιφάνειας. Πέρα από κάποια επίπεδα τραχύτητας, η αντίσταση αυξάνει. Κατά συνέπεια, μία λεία επιφάνεια χωρίς ρύπανση, είναι σημαντικός παράγοντας για την ελαχιστοποίηση της τριβής, για αυτό και τα αντιρρυπαντικά συστήματα και υφαλοχρώματα είναι ένας τομέας με ιδιαίτερα έντονο ενδιαφέρον από άποψη ενεργειακής αποδοτικότητας για τα πλοία.

Η **αντίσταση κυματισμού** προκαλείται από τον εκτοπισμό του νερού όταν το διαπερνάει το πλοίο, δημιουργώντας κύματα. Η αντίσταση κυματισμού είναι πολύ περισσότερο εξαρτώμενη από την ταχύτητα από ότι η αντίσταση τριβής. Σε πολύ χαμηλές ταχύτητες είναι σχεδόν αμελητέα. Για μεγάλα πλοία, όπως τα δεξαμενόπλοια, αντιστοιχεί συνήθως περίπου στο 10% της συνολικής αντίστασης ενώ για ταχύπλοα σκάφη μπορεί να είναι η κυρίαρχη συνιστώσα της αντίστασης.

Εξαιτίας αυτών των δύο παραγόντων, τα πλοία σχεδιάζονται διαφορετικά ανάλογα με τα επίπεδα ταχύτητας που προορίζονται να έχουν. Η ακόλουθη εικόνα αναπαριστά την εξάρτηση της ταχύτητας και του μεγέθους των πλοίων σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας.





Εικόνα 2.4: Κατανάλωση ενέργειας ανά tonne-km για ορισμένες κατηγορίες πλοίων [6]

Η **έλικα** βελτιστοποιείται έτσι ώστε να έχει υψηλή απόδοση και κατάλληλα χαρακτηριστικά σε σχέση με τα ζητήματα της σπηλαιώσης και των δονήσεων στο πλοίο. Δυστυχώς αυτοί οι παράγοντες είναι αλληλοσυγκρουόμενοι, ώστε μία καλή έλικα πρέπει τελικά να είναι αποτέλεσμα συμβιβασμού. Για υψηλή απόδοση, συνήθως η έλικα έχει μεγάλη διάμετρο και μικρή ταχύτητα άξονα. Τα ζητήματα της σπηλαιώσης και των δονήσεων είναι αρκετά σύνθετα.

Η **διάδραση ανάμεσα στο κύτος και την έλικα** είναι, επίσης, ένας πολύ σημαντικός παράγοντας. Για την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας του πλοίου χρησιμοποιούνται συσκευές εξοικονόμησης ενέργειας γύρω από την έλικα αρκετά συχνά στις μέρες μας.

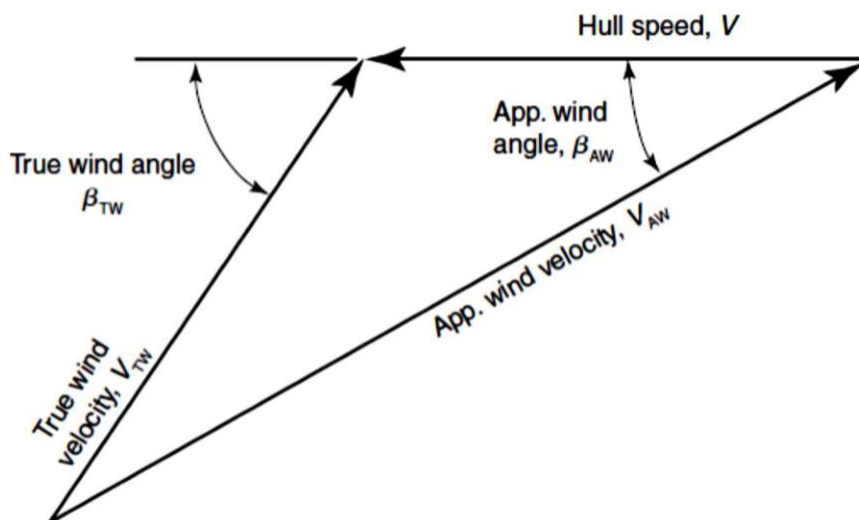
Όπως προαναφέρθηκε, η συνολική αντίσταση του πλοίου εξαρτάται από πληθώρα συνιστωσών και συνιστά ένα πολύπλοκο πρόβλημα. Για να μελετηθεί λοιπόν, εξυπηρετεί η διάσπασή του σε επιμέρους συνιστώσες που εμπεριέχονται στην τελική κατανάλωση του καυσίμου.

### 2.2.1.1 Άνεμος

Ένα πλοίο που πλέει σε ήρεμη θάλασσα και χωρίς άνεμο δέχεται μία αντίσταση λόγω της κίνησης των εξάλων του πλοίου στον αέρα. Η αντίσταση αυτή εξαρτάται από την ταχύτητα του πλοίου και από το σχήμα και την επιφάνεια του πλοίου που βρίσκεται πάνω από το νερό.

Όταν όμως φυσάει άνεμος, η αντίσταση εξαρτάται και από την ταχύτητα του ανέμου και τη σχετική του ταχύτητα. Ο **πραγματικός άνεμος** (true wind) ορίζεται ως ο άνεμος που οφείλεται σε φυσικά αίτια και υπάρχει πάνω από τη θάλασσα ανεξάρτητα του πλοίου. Αντίθετα, ο **φαινόμενος άνεμος** (apparent wind) είναι το διανυσματικό άθροισμα των ταχυτήτων του πλοίου και του πραγματικού ανέμου. Ο φαινόμενος άνεμος είναι η ταχύτητα του ανέμου που «βλέπει» το πλοίο.

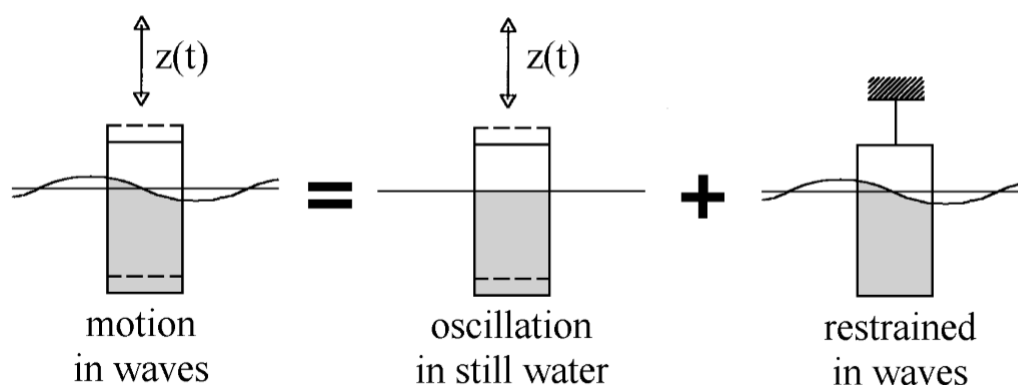
Η ταχύτητα του ανέμου, ακόμα και υπό συνθήκες σταθερού ανέμου, διαφοροποιείται ανάλογα με το ύψος πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας η ταχύτητα είναι πιο αργή και οφείλεται στο οριακό στρώμα που δημιουργείται. Το ύψος του οριακού στρώματος είναι περίπου 7,5 μ. Ένα **ανεμόμετρο** πάνω σε ένα πλοίο αντιλαμβάνεται τον φαινόμενο άνεμο και η ταχύτητά του εξαρτάται από το ύψος που είναι τοποθετημένο το ανεμόμετρο.



Εικόνα 2.5: Πραγματικός και φαινόμενος άνεμος [7]

### 2.2.1.2 Κυματισμός

Η **πρόσθετη αντίσταση κυματισμού** είναι μέρος της συνολικής αντίστασης του πλοίου και προκαλείται από τα κύματα που οφείλονται στα μετεωρολογικά φαινόμενα, κυρίως τα ανεμογενή κύματα. Η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού, παραδοσιακά, μελετάται χωριστά σε δύο συνιστώσες, στην πρόσθετη αντίσταση λόγω των κινήσεων του πλοίου και λόγω της ανάκλασης των κυματισμών, χωρίς βέβαια να παραγνωρίζονται οι αλληλεπιδράσεις.



Εικόνα 2.6: Ανάλυση της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού [8]

Η εκτίμηση της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού είναι σημαντική για:

- Το **περιθώριο καιρού** (weather margin): Το περιθώριο καιρού για καινούρια πλοία μπορεί να εκτιμηθεί βάσει της αύξησης της αντίστασης λόγω καιρού και να γίνει έπειτα κατάλληλη επιλογή μηχανής
- Τον **καθορισμό της πλεύσης ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες** (weather routing): Ο καθορισμός πλεύσης/πορείας σε σχέση με τις καιρικές συνθήκες είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για τα κέρδη ενός πλοίου. Πρωτίστως, μια καλή εκτίμηση βοηθάει στη σωστή προσέγγιση του χρόνου άφιξης ενός πλοίου σε ένα λιμάνι. Έτσι, οι παραλήπτες του φορτίου μπορούν να γνωρίζουν πότε ένα πλοίο θα φτάσει στο λιμάνι, ελαχιστοποιώντας παράλληλα και τα κόστη αποθήκευσης στο λιμάνι. Επίσης, είναι πολύ σημαντικό για την επιλογή της βέλτιστης διαδρομής (route optimization). Αυτό αφορά την αποφυγή των δυσμενών καιρικών συνθηκών και την επιλογή της βέλτιστης διαδρομής ώστε το πλοίο να εκμεταλλευτεί στον

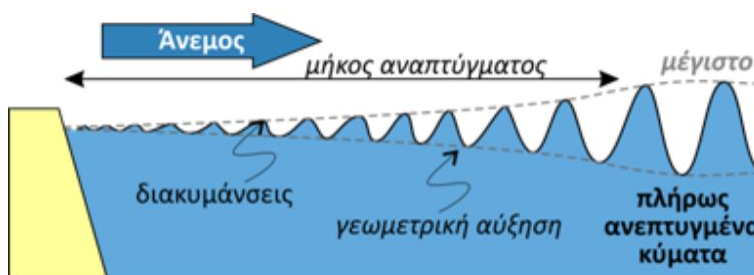
## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

μέγιστο δυνατό βαθμό τις ευνοϊκές καιρικές συνθήκες, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές καυσαερίων.

- Την **ανάλυση της απόδοσης** (performance analysis): Γνωρίζοντας την ολική αντίσταση ενός πλοίου και αφαιρώντας την αντίσταση που οφείλεται στον καιρό, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η αντίσταση του πλοίου σε ήρεμο νερό. Έτσι, οι πλοιοκτήτες μπορούν να αξιοποιήσουν αυτήν την πληροφορία για να αξιολογήσουν την απόδοση του πλοίου και να μεριμνούν για τον καθαρισμό του κύτους σε κατάλληλες χρονικές στιγμές.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ένα VLCC, το οποίο πλέει ως επί το πλείστον σε μικρά μήκη κύματος όπου οι κινήσεις του πλοίου είναι μικρές, η αντίσταση που οφείλεται στην περίθλαση είναι κυρίαρχη. Σε πολύ μεγάλα μήκη κύματος, το πλοίο ακολουθεί την κίνηση των κυμάτων, οπότε δεν υπάρχει πρόσθετη αντίσταση κυματισμού.

Η ανάπτυξη των ανεμογενών κυματισμών εξαρτάται κυρίως από το **βάθος του νερού**, τον **χρόνο** και την **απόσταση** στην οποία επενεργεί ο άνεμος στους κυματισμούς σε μία κατεύθυνση.



Εικόνα 2.7: Ανάπτυξη ανεμογενών κυματισμών

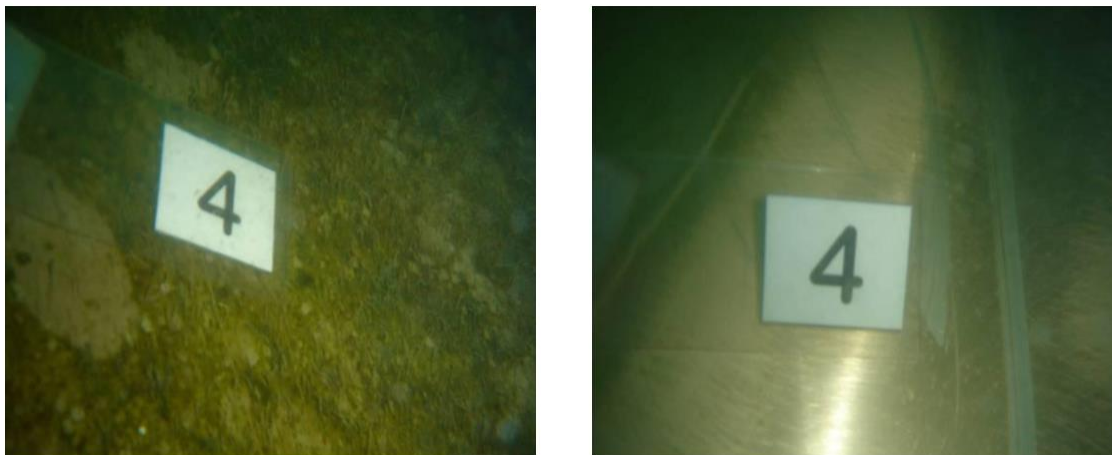
### 2.2.1.3 Ρύπανση του κύτους και της έλικας

Η ρύπανση του κύτους και της έλικας ενός πλοίου με βιολογικούς οργανισμούς είναι ανεπιθύμητη και αυξάνει την αντίσταση του πλοίου. Στον πυθμένα των πλοίων χωρίς κάποια προστασία κατά της ρύπανσης του κύτους, ενδέχεται να συγκεντρωθούν περισσότερα από 150 kg θαλάσσιων οργανισμών ανά  $m^2$ . Κατά συνέπεια, σε ένα VLCC μπορεί να συγκεντρωθούν πάνω από 6.000 τόνοι μικροοργανισμών.

Από τη στιγμή του **δεξαμενισμού** (dry-docking) και ύστερα, η επιφάνεια του πλοίου γίνεται τραχύτερη λόγω της ρύπανσής της. Λόγω της **τραχύτητας** (roughness) δημιουργείται ένα οριακό στρώμα παχύτερο και πιο τυρβώδες που οδηγεί σε αύξηση της

## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

αντίστασης τριβής. Μία μικρής έκτασης ρύπανση μπορεί να προκαλέσει αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 40-50%. [9]



*Εικόνα 2.8: Κατάσταση της έλικας πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) τον καθαρισμό [10]*

Με την πρόληψη της ρύπανσης, λοιπόν, μπορούν να εξοικονομηθούν σημαντικά έξοδα. Για αυτόν τον λόγο κρίνεται αναγκαία η χρήση αντιρρυπαντικών βαφών στα ύφαλα του πλοίου. Τα κύρια χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχει ένα αντιρρυπαντικό σύστημα είναι τα ακόλουθα:

- Ευρύ φάσμα λειτουργίας
- Χαμηλή τοξικότητα για τα θηλαστικά
- Χαμηλή διαλυτότητα στο νερό
- Συμβατότητα με το χρώμα της γάστρας
- Φιλικό προς το περιβάλλον και την τροφική αλυσίδα
- Καλή σχέση μεταξύ τιμής και απόδοσης

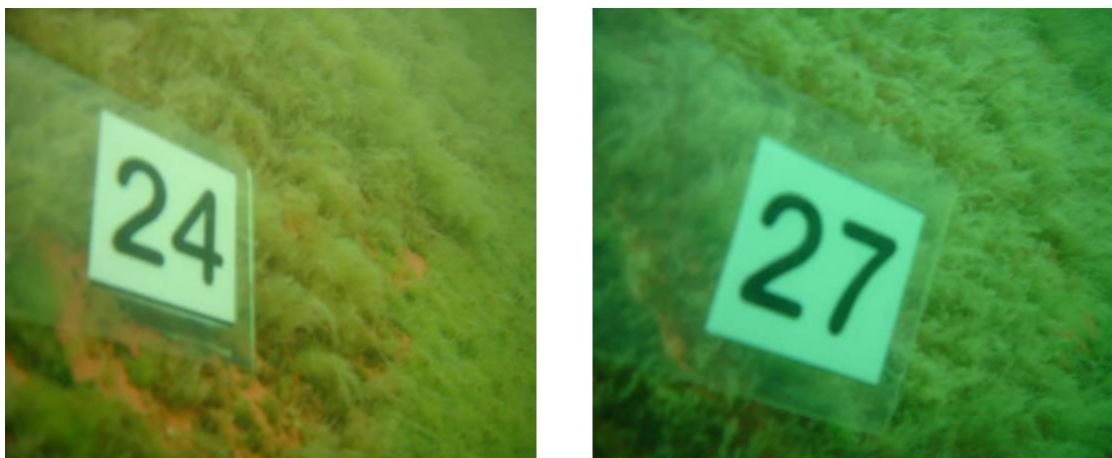
Μεταξύ των δεξαμενισμών γίνονται καθαρισμοί του κύτους και της έλικας, όπου μειώνεται μεν η τραχύτητα αλλά δεν αντικαθίσταται το υφαλόχρωμα. Επίσης, στους καθαρισμούς μπορεί να υπάρξει αποκόλληση του υφαλοχρώματος, με συνέπεια τη ραγδαία αύξηση της ρύπανσης. Ένα αποτελεσματικό σύστημα αντιρρύπανσης, λοιπόν, μπορεί να εξοικονομήσει κεφάλαια στον πλοιοκτήτη σε μια σειρά από τρόπους:

- Άμεση εξοικονόμηση καυσίμων, διατηρώντας το κύτος καθαρό
- Επέκταση του χρόνου μεταξύ δύο δεξαμενισμών, αφού το αντιρρυπαντικό σύστημα παρέχει προστασία για σειρά ετών

## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

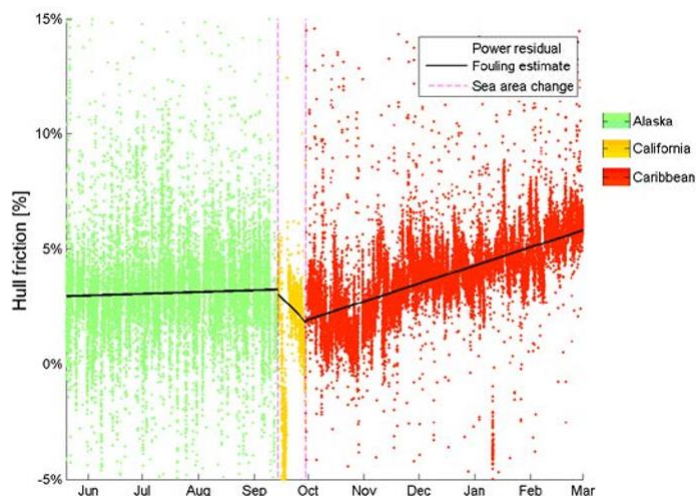
- Αύξηση της διαθεσιμότητας του πλοίου δεδομένου ότι μειώνεται ο χρόνος που ξοδεύεται σε δεξαμενισμούς

Ο βαθμός εμφάνισης της ρύπανσης στα διάφορα τμήματα του κύτους ποικίλλει. Τα σημεία εκείνα τα οποία είναι περισσότερο εκτεθειμένα στο φως (συνήθως στα πλευρά του πλοίου) είναι περισσότερο πιθανό να εμφανίσουν μεγαλύτερα επίπεδα ρύπανσης.



*Εικόνα 2.9: Παράδειγμα διαφορετικού βαθμού ρύπανσης στα διάφορα τμήματα του κύτους [10]*

Επίσης, ο ρυθμός αύξησης της ρύπανσης του κύτους διαφέρει αισθητά από μία γεωγραφική περιοχή του πλανήτη σε άλλη. Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη ρύπανση του κύτους είναι η θερμοκρασία και η αλατότητα του νερού, η τοποθεσία, η περίοδος χρόνου και η ηλιοφάνεια. Αν και δεν έχει εξακριβωθεί ακόμη πώς επιδρούν όλοι αυτοί οι παράγοντες μαζί, η επίδραση της αλλαγής της θάλασσας στη ρύπανση του κύτους φαίνεται στην επόμενη εικόνα. Η ρύπανση επίσης μπορεί να μειώνεται για λίγο, όταν ένα πλοίο εισέρχεται σε διαφορετική περιοχή. Ο πιθανότερος λόγος για αυτό είναι ότι οι οργανισμοί που ζουν σε ένα οικοσύστημα αρχίζουν να καταστρέφονται σε ένα ξένο περιβάλλον, επιτρέποντας ύστερα την ανάπτυξη των οργανισμών του νέου οικοσυστήματος. [11]

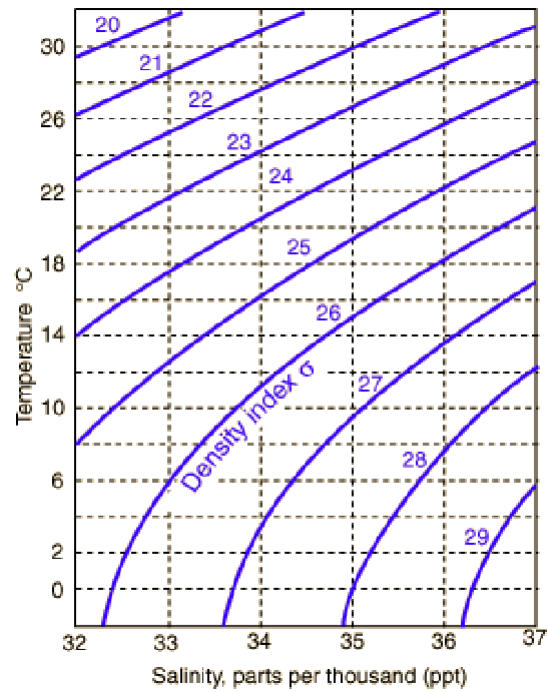


Εικόνα 2.10: Αύξηση της ρύπανσης σε διαφορετικές περιοχές θάλασσας [11]

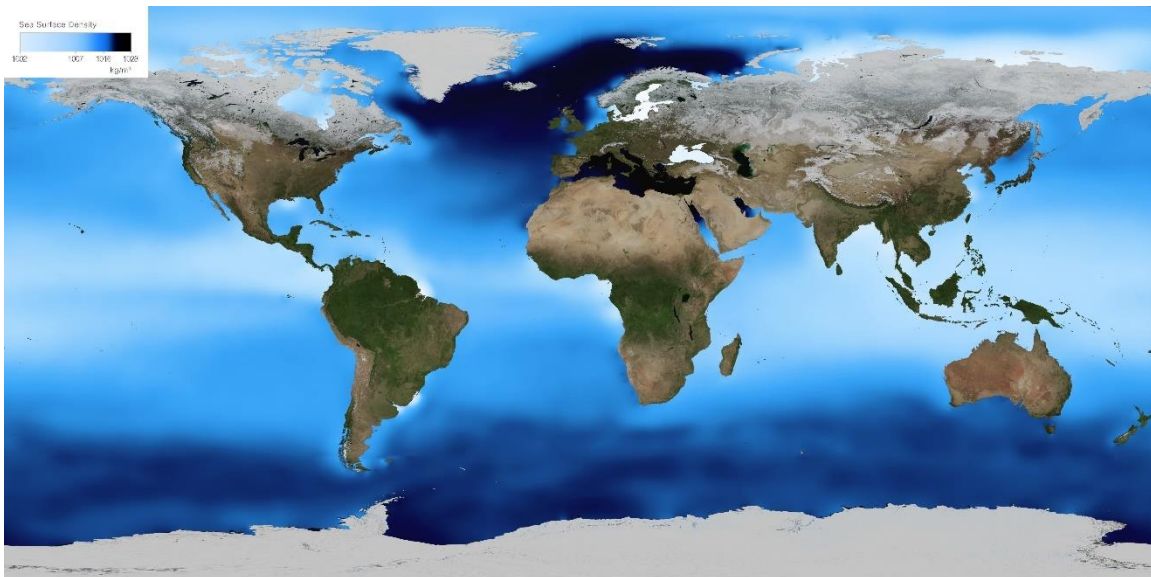
#### 2.2.1.4 Πυκνότητα και συνεκτικότητα θαλασσινού νερού

Για τον υπολογισμό της αντίστασης ενός πλοίου σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας χρησιμοποιούνται διάφορα δεδομένα και απλουστεύσεις, που όμως μπορούν να διαφέρουν σε κάθε σημείο της γης. Ένας από τους σημαντικότερους αυτούς παράγοντες είναι η **πυκνότητα** και η **συνεκτικότητα** του θαλασσινού νερού, οι οποίες εξαρτώνται κυρίως από τη θερμοκρασία και την αλατότητα του νερού στα επιφανειακά στρώματα της θάλασσας, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο διάγραμμα.

## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις



Εικόνα 2.11: Μεταβολή της πυκνότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας και της αλατότητας του νερού [[hyperphysics.phy-astr.gsu.edu](http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu)]



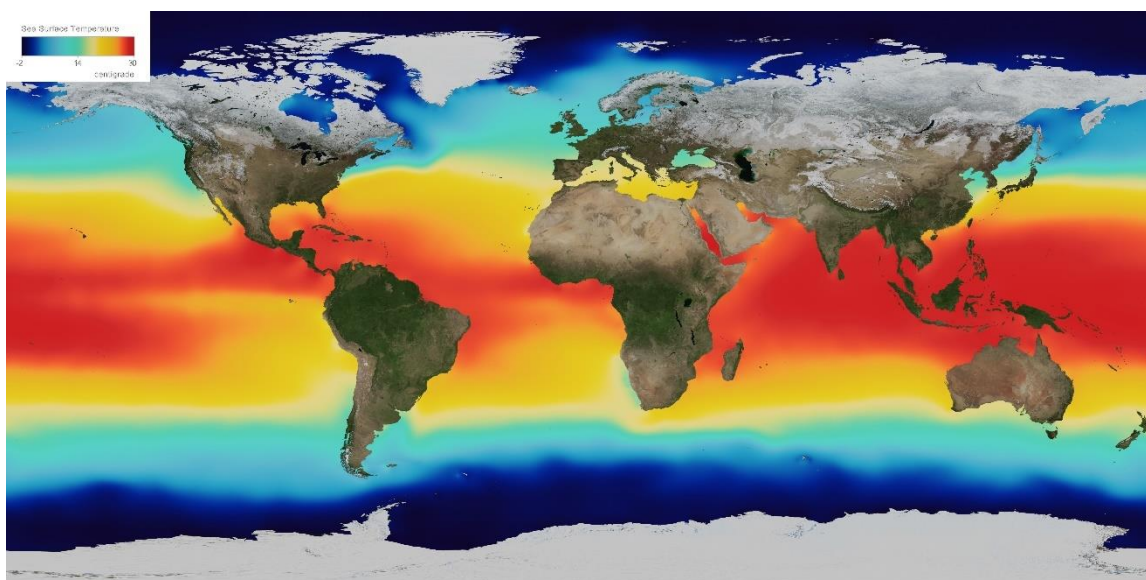
Εικόνα 2.12: Διακύμανση της πυκνότητας του θαλασσινού νερού [[www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)]



### 2.2.1.5 Θερμοκρασία θαλασσινού νερού

Όταν το φως του ηλίου πέφτει στην επιφάνεια της θάλασσας, θερμαίνει τα πάνω στρώματα του νερού σαφώς πιο εύκολα. Στους ωκεανούς, η περισσότερη ενέργεια απορροφάται στα πρώτα 50 cm. Στα 2 μ. βάθος, το 98% της ενέργειας έχει απορροφηθεί και μετατραπεί σε θερμότητα. [12]

Το νερό έχει πολύ μεγάλη θερμοχωρητικότητα, οπότε όταν ζεταίνεται παραμένει θερμό για μεγάλο διάστημα. Οι εποχιακές μεταβολές στις θερμοκρασίες των ωκεανών υστερούν περίπου 2 μήνες των εποχιακών αλλαγών στη στεριά. Η καθυστέρηση αυτή είναι μεγαλύτερη σε ωκεανούς με μεγάλα βάθη. [13] Η επιφανειακή θερμοκρασία του νερού επηρεάζεται έντονα από τις αλλαγές της θερμότητας που δέχεται. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η έντονη διακύμανση της επιφανειακής θερμοκρασίας σε κάθε σημείο της γης.



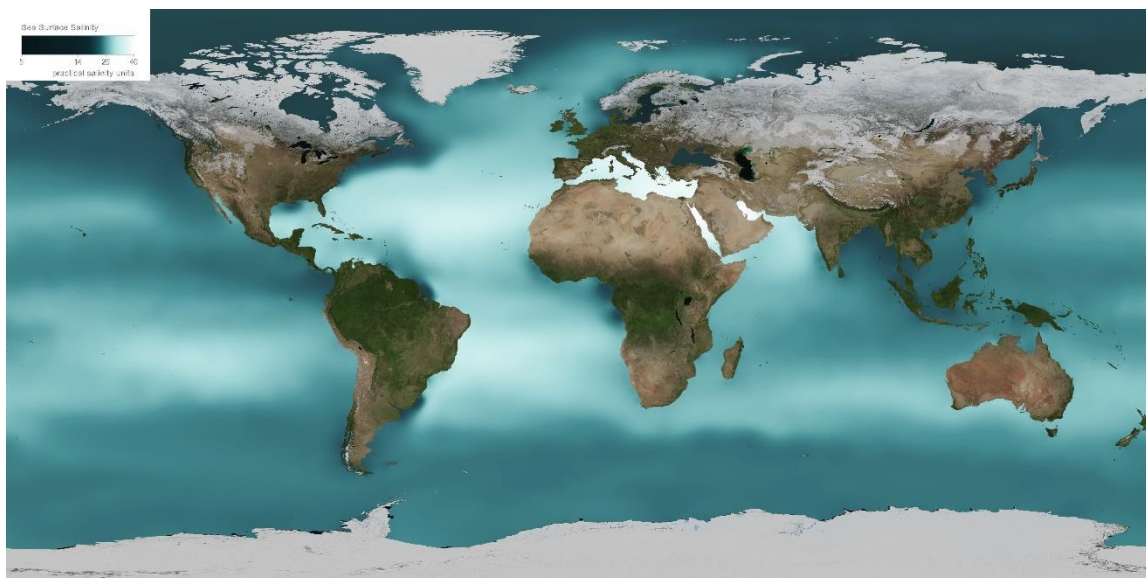
Εικόνα 2.13: Η επιφανειακή θερμοκρασία της θάλασσας σε κάθε σημείο της γης για μια συγκεκριμένη στιγμή [www.nasa.gov]

### 2.2.1.6 Αλατότητα του νερού

Η συνολική ποσότητα διαλυμένου υλικού στο νερό ονομάζεται **αλατότητα** και εκφράζεται σε μονάδες psu, που είναι η αναλογία σε 1.000 g. Η εξάτμιση του νερού των ωκεανών και ο σχηματισμός πάγων στη θάλασσα αυξάνουν την αλατότητα του νερού. Αντίθετα, η

## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

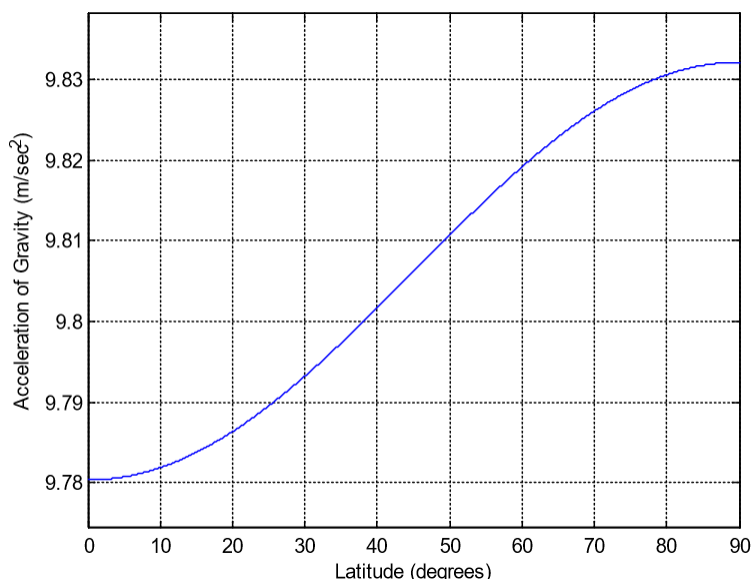
συνεχής εισροή γλυκού νερού από τους ποταμούς, τη βροχή και το χιόνι, η τήξη των πάγων, η ύπαρξη θαλάσσιων ρευμάτων κ.ά. είναι παράγοντες που αντισταθμίζουν τα επίπεδα της αλατότητας του νερού σε ισορροπία. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η αλατότητα του νερού σε μια χρονική στιγμή σε κάθε σημείο της γης.



Εικόνα 2.14: Διακύμανση της αλατότητας του νερού [www.nasa.gov]

### 2.2.1.7 Επιτάχυνση της βαρύτητας

Η επιτάχυνση της βαρύτητας  $g$  διαφέρει ανάλογα με το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας και το γεωγραφικό πλάτος. Ένα πλοίο πλέει, προφανώς, πάντα στο επίπεδο της θάλασσας, οπότε η τιμή του  $g$  είναι συνάρτηση μόνο του γεωγραφικού πλάτους. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται γραφικά η εξάρτηση της τιμής του  $g$  από το γεωγραφικό πλάτος και παρατηρείται ξεκάθαρα ότι στον ισημερινό η τιμή του  $g$  γίνεται ελάχιστη, ενώ στους πόλους μέγιστη.

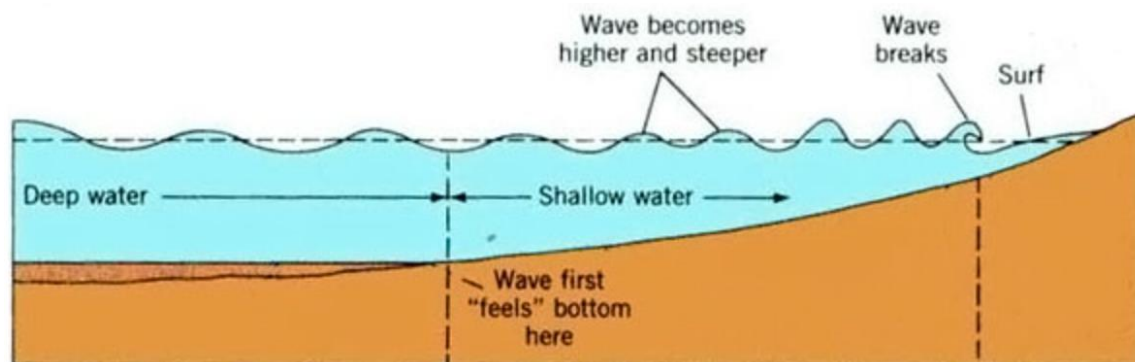


Εικόνα 2.15: Η επιτάχυνση της βαρύτητας συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους

#### 2.2.1.8 Βάθος της θάλασσας

Το βάθος των υδάτων στα οποία πλέει ένα πλοίο παίζει κυρίαρχο ρόλο στη συνολική του αντίσταση. Το βάθος της θάλασσας, εκτός από την πυκνότητα του νερού που αναπτύχθηκε παραπάνω, επηρεάζει την αντίσταση με τρεις διαφορετικούς τρόπους, οι οποίοι περιγράφονται παρακάτω συνοπτικά.

- **Δυναμική ροή γύρω από το κύτος:** Αν το πλοίο πλέει σε ρηχά νερά απεριορίστου πλάτους, τότε το νερό που περνάει κάτω από το πλοίο επιταχύνεται περισσότερο από ότι στο βαθύ νερό. Κατά συνέπεια, σε ρηχά νερά η βύθιση και η διαγωγή θέτουν ένα άνω όριο πλεύσης.
- **Επίδραση βάθους νερού στην αντίσταση κυματισμού:** Μια δεύτερη επίδραση είναι οι αλλαγές στη μορφή των κυματισμών και στην απολυόμενη ενέργεια του πλοίου που συμβαίνουν στο πέρασμα από βαθύ σε ρηχό νερό.
- **Διαφοροποίηση της διασποράς των κυματισμών:** Μια γραφική αναπαράσταση της συμπεριφοράς των κυμάτων σε διαφορετικά βάθη φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα. Τα κύματα σε βαθύ νερό έχουν μεγαλύτερο μήκος κύματος και μικρότερο ύψος κύματος, ενώ πηγαίνοντας σε περιοχή ρηχού νερού τα κύματα γίνονται υψηλότερα και μικρότερα σε μήκος.



Εικόνα 2.16: Σχηματική αναπαράσταση της συμπεριφοράς των κυμάτων σε βαθύ και ρηχό νερό [Surf-forecast.com]

#### 2.2.1.9 Θαλάσσια ρεύματα

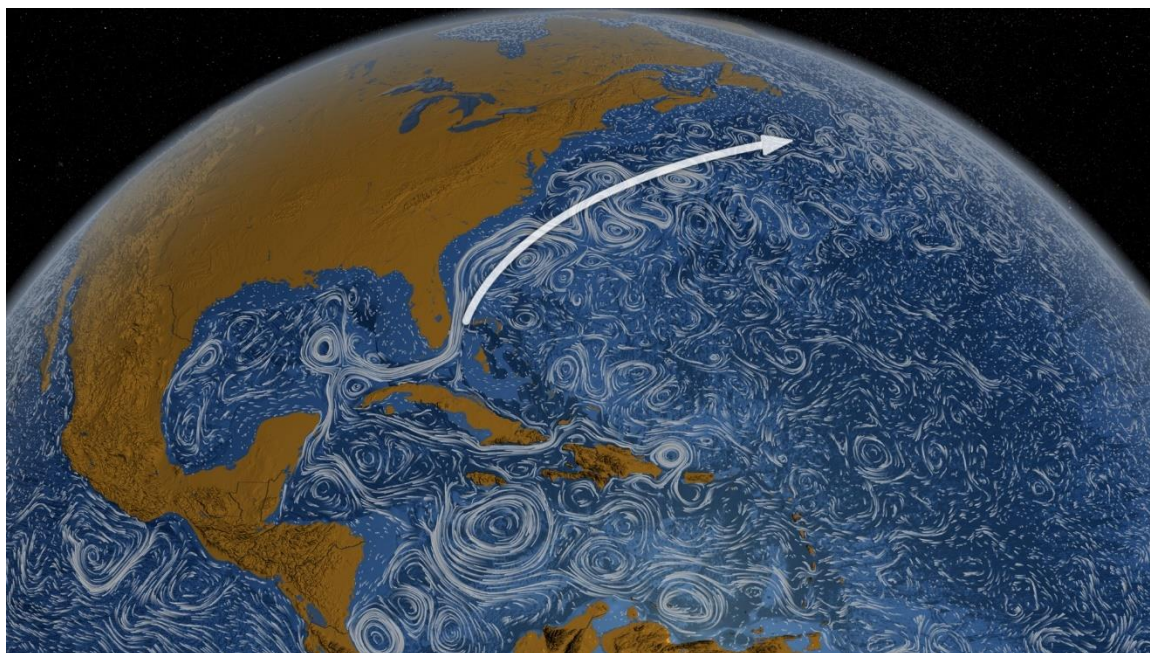
Τα θαλάσσια ρεύματα επηρεάζουν τη ναυσιπλοΐα με διάφορους τρόπους. Κυρίως αυξομειώνουν την ταχύτητα του πλοίου και δευτερευόντως προκαλούν παρέκκλιση της πορείας του από την επιθυμητή.

Όταν το πλοίο πλέει σε **ευνοϊκό ρεύμα**, δηλαδή όταν η **πορεία** (course) του πλοίου συμπίπτει με την κατεύθυνση του ρεύματος, η πραγματική ταχύτητα του πλοίου ως προς τη θάλασσα (speed over water) είναι μικρότερη από την ταχύτητα ως προς το έδαφος (speed over ground). Στην αντίθετη κατεύθυνση ρεύματος, η ταχύτητα ως προς τη θάλασσα είναι σαφώς μεγαλύτερη.

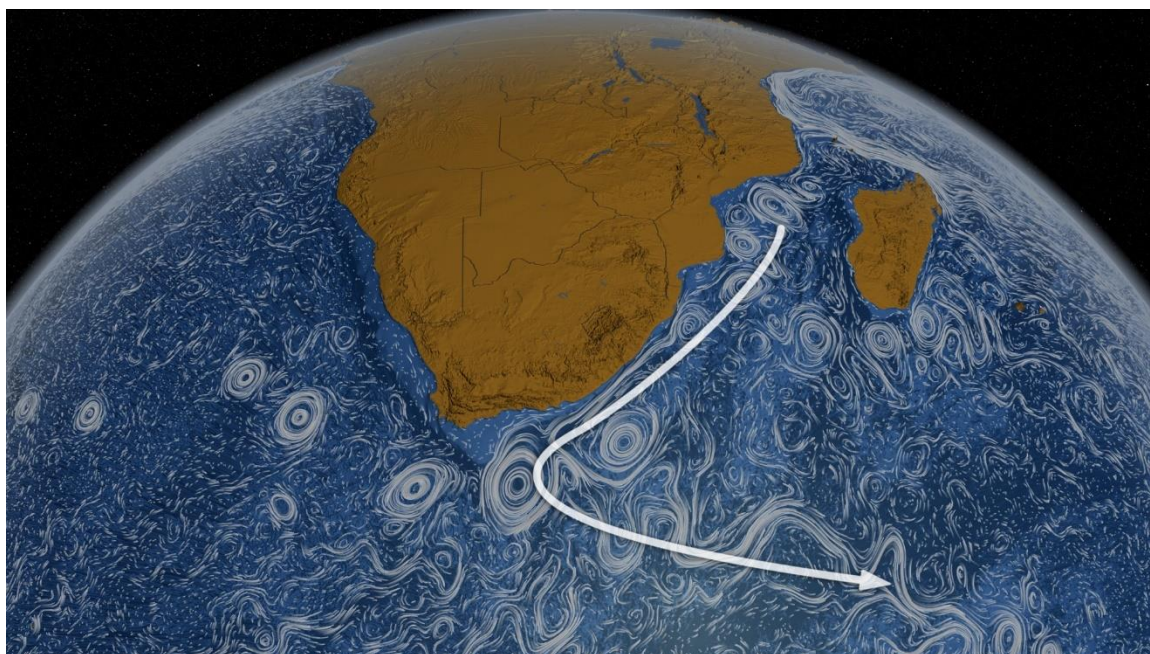
Σε περίπτωση **πλάγιων ρευμάτων**, το πλοίο υπόκειται σε παρέκκλιση της πορείας του, η οποία αυξάνει την απόσταση που πρέπει να καλυφθεί και τροποποιεί την περιοχή πιέσεων και τη δυναμική ροή γύρω από το κύτος. Για τον λόγο αυτόν, είναι σημαντικό στη χάραξη της πορείας ενός ταξιδιού, να σχεδιάζεται ο πλους με τέτοιο τρόπο ώστε να πλέει το πλοίο σε όσο το δυνατόν ευνοϊκή κατάσταση ρευμάτων.

Τα πλοία συνήθως λαμβάνουν αυτές τις πληροφορίες από ιδιωτικές υπηρεσίες όπως η Applied Weather Technology (AWT), η Ocean Routes ή άλλες ωκεανογραφικές υπηρεσίες (π.χ. Αγγλικό ναυαρχείο, παράκτιους σταθμούς, εταιρείες weather routing) ή άλλων δορυφορικών συστημάτων.

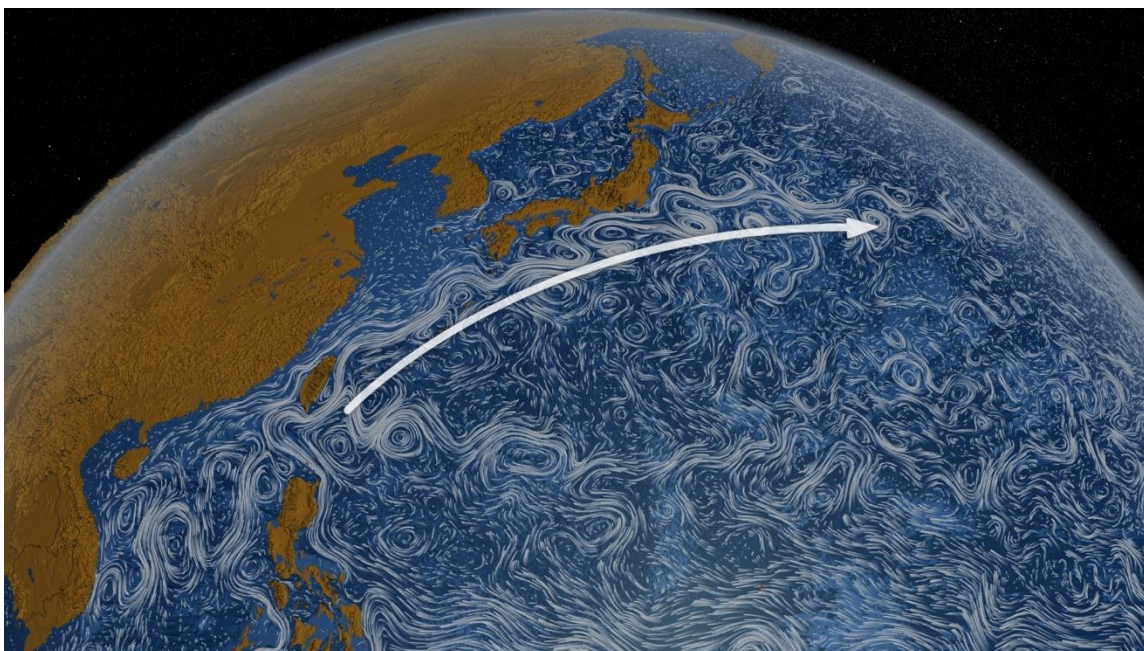
Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζονται με έντονα λευκά ίχνη τα κύρια ωκεάνια ρεύματα σε διάφορες περιοχές του πλανήτη. Οι ταχύτητες των ρευμάτων που μπορεί να συναντήσει ένα πλοίο φτάνουν συνήθως μέχρι τους 2,5 κόμβους.



*Εικόνα 2.17: Το ρεύμα του Κόλπου μεταφέρει θερμές ωκεάνιες μάζες από την ανατολική ακτογραμμή των Η.Π.Α. σε περιοχές του Βόρειου Ατλαντικού Ωκεανού [www.nasa.gov]*



*Εικόνα 2.18: Το ρεύμα Agulhas ταξιδεύει κατά μήκος της ακτογραμμής της Μοζαμβίκης και της Νότιας Αφρικής και στη συνέχεια εξελίσσεται προς τα ανατολικά [www.nasa.gov]*



*Εικόνα 2.19: Το ρεύμα Kuroshio ρέει προς τις βορειοανατολικές ακτές της Ιαπωνίας, μεταφέροντας θερμές ωκεάνειες μάζες που κυκλοφορούν ανατολικά της Ταϊβάν [www.nasa.gov]*

### 2.2.2 Παράγοντες έμμεσης εξάρτησης

Άλλοι παράγοντες, που επηρεάζουν έμμεσα την κατανάλωση του καυσίμου στο πλοίο είναι οι ακόλουθοι:

- Χρόνος παραμονής σε λιμάνι
- Ταχύτητα λειτουργίας εν πλώ
- Ποιότητα καυσίμου
- Απόδοση μηχανής – συχνότητα συντήρησης
- Κατάσταση φόρτωσης
- Γωνία πηδαλίου (rudder angle)
- Δείκτης pH θαλασσινού νερού, συγκέντρωση οξυγόνου
- Θερμοκρασία ατμόσφαιρας, επίπεδα υγρασίας κ.ά.

Συμπερασματικά, όσον αφορά τις επιμέρους συνιστώσες που επηρεάζουν την κατανάλωση του καυσίμου είναι προφανές ότι έχουν μεγάλη εξάρτηση από τη γεωγραφική θέση και τον χρόνο στον οποίο γίνονται οι παρατηρήσεις, αφού αυτά κατά τη διάρκεια της πορείας ενός πλοίου μεταβάλλονται διαρκώς. Συνηθίζεται, ωστόσο, ο υπολογισμός της αντίστασης του

πλοίου να απλουστεύεται λαμβάνοντας υπόψη κυρίως τα παρακάτω δεδομένα, για δεδομένη τοποθεσία και χρονική στιγμή:

- Ένταση και κατεύθυνση ανέμου
- Ταχύτητα και φορά θαλάσσιων ρευμάτων
- Ύψος και μήκος κύματος
- Θερμοκρασία, αλατότητα του νερού

### 2.3 Ανασκόπηση αντίστοιχων μελετών

Εκτός από την αύξηση της ταχύτητας, η αντίσταση και η κατανάλωση καυσίμου αυξάνονται με οποιαδήποτε από τις ακόλουθες τρεις παραμέτρους [14]:

- Αυξημένο βύθισμα και μετατόπιση
- Επιδείνωση των καιρικών συνθηκών
- Επιδείνωση της τραχύτητας του κύτους και της έλικας

Πολλές θεωρίες και μέθοδοι για την εκτίμηση της συμβολής καθεμιάς από αυτές τις παραμέτρους στην αυξημένη αντίσταση και την κατανάλωση καυσίμων μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία [15]. Ωστόσο, οι περισσότερες βασίζονται σε πειράματα που προέκυψαν από σειρές δοκιμών σε συγκεκριμένους τύπους πλοίων και μορφές κύτους. Ως εκ τούτου, συνιστάται να διεξάγεται συνεχής στατιστική ανάλυση του ταξιδιού για τη διερεύνηση της επιρροής του βυθίσματος του πλοίου, του καιρού και της κατάστασης του κύτους και της έλικας για την παραγωγή της καμπύλης κατανάλωσης καυσίμου έναντι της καμπύλης ταχύτητας, γεγονός που αντιπροσωπεύει μια πιο ρεαλιστική και ακριβή προσέγγιση σε σύγχρονα πλοία, όπως απαιτείται. Μία τέτοια προσέγγιση υποθέτει ότι οι προβλέψεις που βασίζονται στην απόδοση του προηγούμενου έτους είναι πιο ακριβείς και αξιόπιστες από αυτές που βασίζονται στις δοκιμές παραλαβής (sea trials).

Με τον υπολογισμό της καμπύλης κατανάλωσης καυσίμου και ταχύτητας, με υψηλό βαθμό ακρίβειας, είναι πιθανόν να επιτευχθεί μια πιο αξιόπιστη εκτίμηση του απαιτούμενου καυσίμου σε ένα μελλοντικό ταξίδι ή ακόμη και για ένα αδελφό πλοίο. Ένα απλό παράδειγμα για την εκτίμηση της σημασίας της καθιέρωσης μιας τέτοιας μεθόδου μπορεί να γίνει λαμβάνοντας υπόψη ότι η κύρια οικονομική επιβάρυνση του πλοιοκτήτη υπό καθεστώς χρονοναύλωσης είναι το κόστος καυσίμων και ότι εξετάζονται 280 ετήσιες ημέρες λειτουργίας με κατανάλωση 50 τόνων ανά ημέρα σε κόστος καυσίμων 400 USD/τόνο. Ένα λάθος 5% στους υπολογισμούς καυσίμων αγγίζει εύκολα 280.000 USD/έτος, δηλαδή περίπου 770 USD/ημέρα αύξηση του λειτουργικού τους κόστους. Ως

## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

εκ τούτου, μια μικρή απόκλιση στον υπολογισμό των καυσίμων αμέσως αντανακλάται σε ένα λειτουργικό κόστος σημαντικά υψηλότερο ή χαμηλότερο από το προβλεπόμενο, πράγμα που σημαίνει ότι οι πλοιοκτήτες μπορούν αντίστοιχα να μειώσουν ή να αυξήσουν τα αναμενόμενα έσοδά τους.

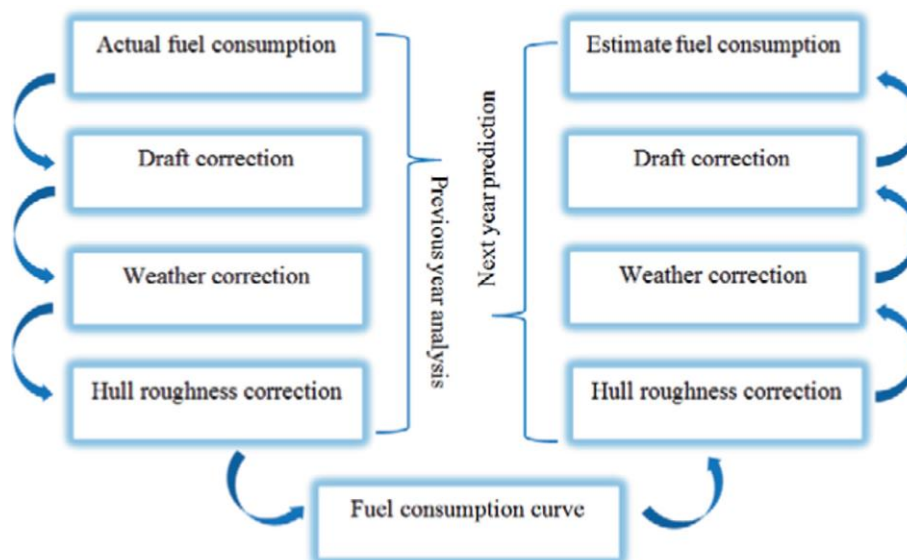
Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητο να λαμβάνονται αποφάσεις κάνοντας τις καλύτερες δυνατές προβλέψεις σχετικά με την κατανάλωση καυσίμων, ιδίως σήμερα λόγω του μειωμένου περιθωρίου κέρδους για τις ναυτιλιακές επιχειρήσεις και λόγω του ενδιαφέροντος για τη λειτουργία των πλοίων με χαμηλές εκπομπές CO<sub>2</sub>.

Στη μελέτη των Feiyang Zhao et al. (2015) [16] παρουσιάζεται ένα μοντέλο προσομοίωσης του συνολικού συστήματος πρόωσης πλοίου. Τούτο περιλαμβάνει μοντελοποίηση σε περιβάλλον MATLAB/Simulink της κύριας μηχανής και της προπέλας. Το μοντέλο μέσης τιμής κύκλου χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει τη λειτουργία του κινητήρα, το σύστημα εισαγωγής/εξάτμισης καθώς και τον υπερσυμπιεστή. Το σύστημα του άξονα του πλοίου μοντελοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το ισοζύγιο ισχύος και την απόδοση του συστήματος. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη προσομοίωσης αναφορικά με την κατανάλωση του καυσίμου, της ισχύος που μεταφέρεται από τον κινητήρα στον άξονα και την ταχύτητα του πλοίου ελέγχθηκαν με πραγματικά δεδομένα που μετρήθηκαν υπό διαφορετικές συνθήκες του κινητήρα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η απόκλιση ανάμεσα στις προσδοκώμενες και τις πραγματικές τιμές που μετρήθηκαν οφείλεται αφενός στην ανακριβή πρόβλεψη του κυματισμού και των καιρικών συνθηκών αφετέρου στο γεγονός ότι στη μελέτη δεν λαμβάνονται υπόψη οι βοηθητικές μηχανές του πλοίου που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια των χειρισμών του πλοίου. [16]

Η κεντρική ιδέα της μελέτης των N. Bialyostocki, D. Konovessis [17] είναι πως οι πλοιοκτήτες έχουν αρκετή πληροφορία σχετικά με την απόδοση του πλοίου από τις μεσημβρινές αναφορές ημερολογίου (noon reports). Επομένως, αυτά τα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιούνται και να επικαιροποιούνται από έτος σε έτος, αντί να γίνεται εκτίμηση της κατανάλωσης καυσίμου βάσει των δοκιμών παραλαβής (sea trials) πλέον κάποιου περιθωρίου ανοχής. Η μεθοδολογία που ακολούθησαν οι N. Bialyostocki, D. Konovessis για την πρόβλεψη της καμπύλης κατανάλωσης καυσίμου και ταχύτητας παρουσιάζεται συνοπτικά στην ακόλουθη εικόνα.



## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις



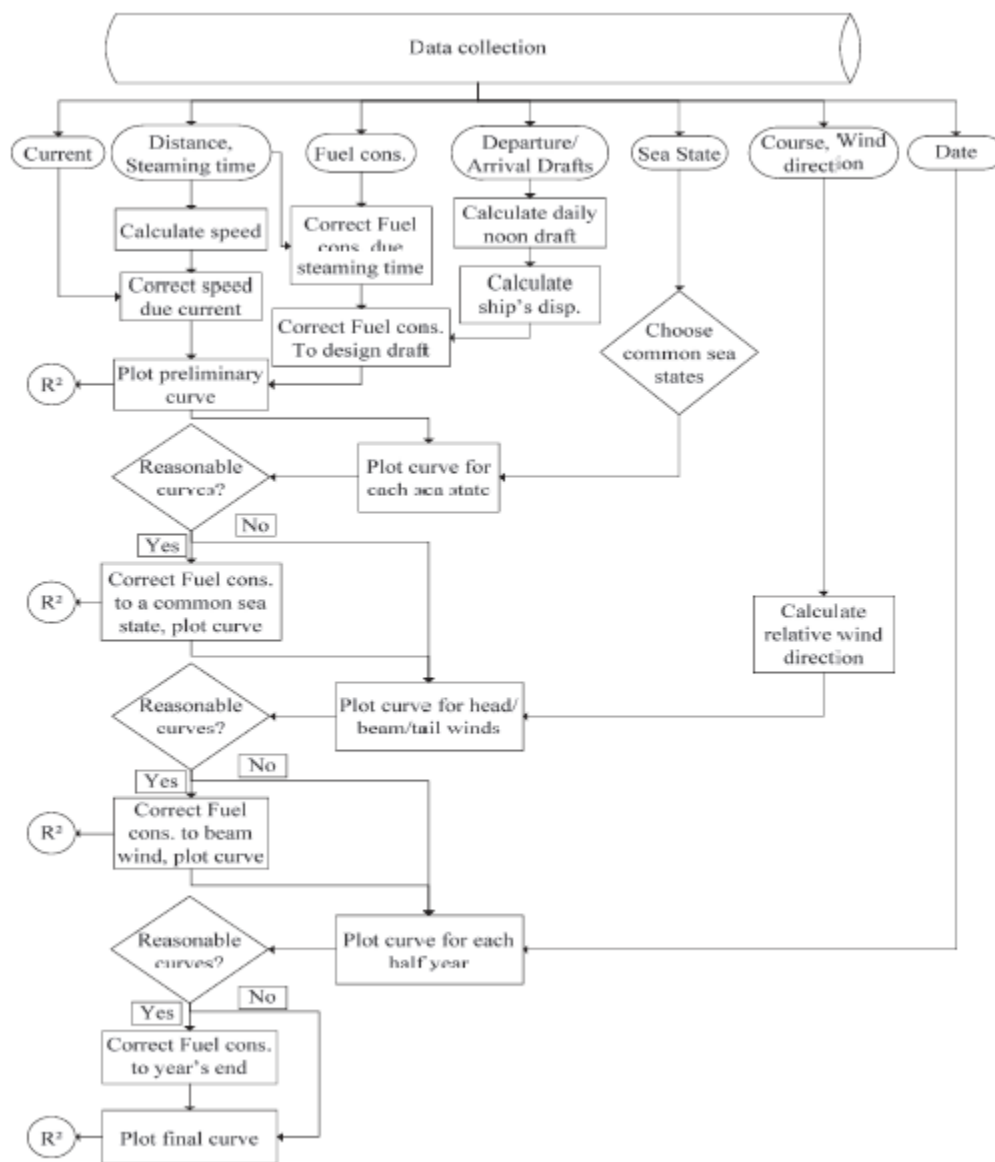
Εικόνα 2.20: Περιγραφή διαδικασίας πρόβλεψης καμπύλης κατανάλωσης καυσίμου [17]

Για τον σκοπό αυτό, αξιολογήθηκαν τέσσερις παράμετροι:

- Βύθισμα πλοίου στο υπό μελέτη ταξίδι
- Ένταση ανέμου
- Κατεύθυνση ανέμου
- Ημερομηνία επερχόμενου ταξιδιού

Το βύθισμα υπολογίστηκε από υδροστατικούς πίνακες και πίνακες σταθερότητας, ενώ ως είσοδος λήφθηκε το προβλεπόμενο βάρος φορτίου και ο διαχωρισμός του στις αποθήκες φορτίου. Η πρόγνωση του καιρού χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη της έντασης και της κατεύθυνσης του ανέμου, ενώ η ημερομηνία του αναμενόμενου ταξιδιού απαιτήθηκε επίσης για τον υπολογισμό της κατανάλωσης καυσίμου. Σε αυτή τη βάση, η επόμενη απεικονίζει τον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε για την πρόβλεψη της καμπύλης κατανάλωσης καυσίμου και ταχύτητας.

## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις



Εικόνα 2.21: Περίγραμμα διαδικασίας πρόβλεψης καμπύλης κατανάλωσης καυσίμου [17]

Χρησιμοποιώντας την τελική καμπύλη που αποκτήθηκε μέσω του αλγορίθμου που περιγράφεται στην προηγούμενη εικόνα, κατέστη δυνατή η εκτίμηση της κατανάλωσης καυσίμου σε ένα μελλοντικό ταξίδι, βάσει προκαθορισμένων πληροφοριών.

## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

Δύο από τα βασικότερα πλεονεκτήματα του αλγορίθμου που ανέπτυξαν οι N. Bialyostocki, D. Konovessis είναι η απλότητα εφαρμογής του καθώς και η αποδεκτή ακρίβεια των αποτελεσμάτων που προκύπτουν σχετικά με την εκτίμηση της κατανάλωσης καυσίμου.

Στη μελέτη των Lokukaluge P. Perera, B. Mo et al. [18] αναλύεται ένα επιλεγμένο σύνολο δεδομένων σχετικών με την επίδοση του πλοίου: ταχύτητα πλοίου ως προς το έδαφος, διαδρομή, κατανάλωση καυσίμου, ισχύς κύριας και βοηθητικών μηχανών, στροφές άξονα κύριας μηχανής, συνθήκες φόρτωσης και βυθίσματος σε σχέση με τη διαδρομή, τη διάρκεια του ταξιδιού και την ένταση του ανέμου. Εντούτοις, δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι απαιτούμενες διορθώσεις στις παραμέτρους ούτως ώστε να επιτευχθεί η αφαίρεση της επίδρασης του ρεύματος του αέρα και των κυμάτων από τα δεδομένα ταχύτητας-ισχύος, λόγω της μη διαθεσιμότητας των ίδιων συνθηκών ταχύτητας σε μια επαναλαμβανόμενη διαδρομή με τις ίδιες περιβαλλοντικές καιρικές συνθήκες. Επιπλέον, η απόδοση του πλοίου σε κατάσταση ερματισμού (ballast condition) δεν έχει ενσωματωθεί σε αυτό το επιλεγμένο σύνολο δεδομένων. [18]

Στη μελέτη των A. Coraddu, L. Oneto et al. [19] οι συγγραφείς διερευνούν τα προβλήματα πρόβλεψης της κατανάλωσης καυσίμου και της παροχής της καλύτερης τιμής για επίπεδο φόρτωσης ενός πλοίου σε πραγματική λειτουργία με βάση τα δεδομένα που μετρούνται από τα συστήματα αυτοματισμού επί του πλοίου. Αναλύονται τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις για την πρόβλεψη της κατανάλωσης καυσίμου: Μοντέλα Λευκού, Μαύρου και Γκρι Κουτιού. Τα μοντέλα Λευκού Κουτιού (White Box Model – WBM) βασίζονται στη γνώση των φυσικών διαδικασιών. Τα μοντέλα Μαύρου Κουτιού (Black Box Model – BBM) βασίζονται σε διαδικασίες στατιστικών συμπερασμάτων με βάση την ιστορική συλλογή δεδομένων. Τέλος, οι συγγραφείς προτείνουν δύο διαφορετικά Μοντέλα Γκρι Κουτιού (Grey Box Model – GBM) τα οποία μπορούν να αξιοποιήσουν τόσο τη μηχανική γνώση των υποκείμενων φυσικών αρχών όσο και τις διαθέσιμες μετρήσεις. Με βάση αυτά τα μοντέλα πρόβλεψης της κατανάλωσης καυσίμου προτείνεται μια νέα στρατηγική για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης ενός πλοίου. [19]

Σε άλλη μελέτη τους, οι Lokukaluge P. Perera και B. Mo (2016) [20] στόχευσαν στην ανάπτυξη κατάλληλου πλαισίου διαχείρισης δεδομένων που προέρχονται από διάφορες πηγές σχετικές με την πλοήγηση του πλοίου, προκειμένου να ξεπεραστούν οι τρέχουσες προκλήσεις της απόδοσής του υπό διάφορες καιρικές συνθήκες. Το προτεινόμενο πλαίσιο χειρισμού δεδομένων αποτελείται από δύο κύρια τμήματα, προ- και μετα- τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων. Το τμήμα της προκαταρκτικής επεξεργασίας είναι μια εφαρμογή επί του πλοίου και αποτελείται από την ανίχνευση και διάγνωση διαφόρων σφαλμάτων στους αισθητήρες, την ταξινόμηση των δεδομένων καθώς και διαδικασίες συμπίεσής τους. Η προκαταρκτική αυτή επεξεργασία μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα και να μειώσει την

ποσότητα των δεδομένων που πρόκειται να μεταδοθούν στα κέντρα δεδομένων της στεριάς. Το τμήμα μετά την επεξεργασία των δεδομένων στη στεριά περιλαμβάνει βήματα επέκτασης, επαλήθευσης της ακεραιότητας και αξιοπιστίας καθώς και παλινδρομήσεων στα δεδομένα. Με αυτόν τον τρόπο, βελτίωσαν την οπτικοποίηση των δεδομένων που αναπαριστούν την απόδοση του πλοίου. Μέσα από τη συσχέτιση της ταχύτητας του ανέμου και της απόδοσης του πλοίου κατέστη δυνατή η ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων για την αξιολόγηση της απόδοσης του πλοίου. [20]

Σε μεταγενέστερη μελέτη τους, οι προαναφερόμενοι Lokukaluge P. Perera και B. Mo [21] προτείνουν την ανάλυση δεδομένων που προέρχονται από τη λειτουργία της κύριας μηχανής ως μέρος του σχεδίου διαχείρισης της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου (Ship Energy Efficiency Management Plan - SEEMP). Το SEEMP επιβάλλει διάφορα μέτρα ελέγχου των εκπομπών για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των πλοίων, λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα επιδόσεων των πλοίων και τα δεδομένα πλοήγησης. Οι προτεινόμενες αναλύσεις δεδομένων αναπτύσσονται στο διάγραμμα συνδυασμού κινητήρα-έλικας (δηλαδή ένας άξονας έλικας με κύρια μηχανή άμεσης οδήγησης). Ως εκ τούτου, αυτές οι αναλύσεις δεδομένων μπορούν να παρακολουθούν τις επιδόσεις των πλοίων και τις συνθήκες πλοήγησης σε σχέση με τις περιοχές λειτουργίας του κινητήρα ως μέρος του SEEMP. [21]

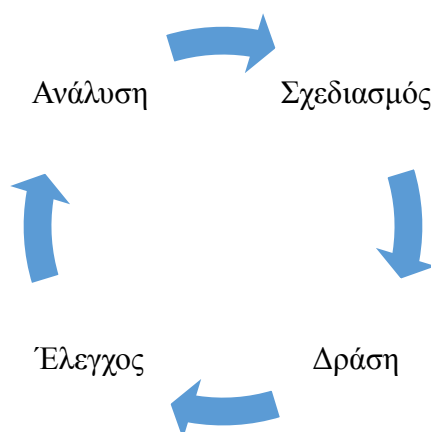
### **2.4 Ανασκόπηση συστημάτων / εργαλείων**

Καθώς το κόστος λειτουργίας των πλοίων και οι τιμές των καυσίμων συνεχίζουν να αυξάνονται, είναι πιο επιτακτική από ποτέ η ανάγκη οι πλοιοκτήτες και οι φορείς εκμετάλλευσης να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας και να βελτιώσουν τη συνολική απόδοση του στόλου ή μεμονωμένων πλοίων. Ωστόσο, προκειμένου να υλοποιηθούν και να διαχειριστούν τις απαιτούμενες βελτιώσεις, θα πρέπει πρώτα να εκτιμηθούν τα επίπεδα απόδοσης μέσω της αξιοποίησης των «έξυπνων» δεδομένων.

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί στα προηγούμενα, η κατανάλωση ενέργειας ενός πλοίου εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους. Αυτές περιλαμβάνουν τις επικρατούσες καιρικές και θαλάσσιες συνθήκες, την τεχνική απόδοση των μηχανών, την κατάσταση συντήρησης καθώς και λειτουργικούς παράγοντες, όπως το φορτίο και τις συνθήκες ρύθμισης. Μόλις συλλεχθούν και μετρηθούν τα δεδομένα για κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία, θα πρέπει τα δεδομένα αυτά να αναλυθούν ώστε να μετατραπούν σε πληροφορία χρήσιμη στον διαχειριστή του πλοίου προκειμένου να κατανοήσει τον αντίκτυπο οποιασδήποτε ενέργειας στο πλήρες οικονομικό μοντέλο του πλοίου.

## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

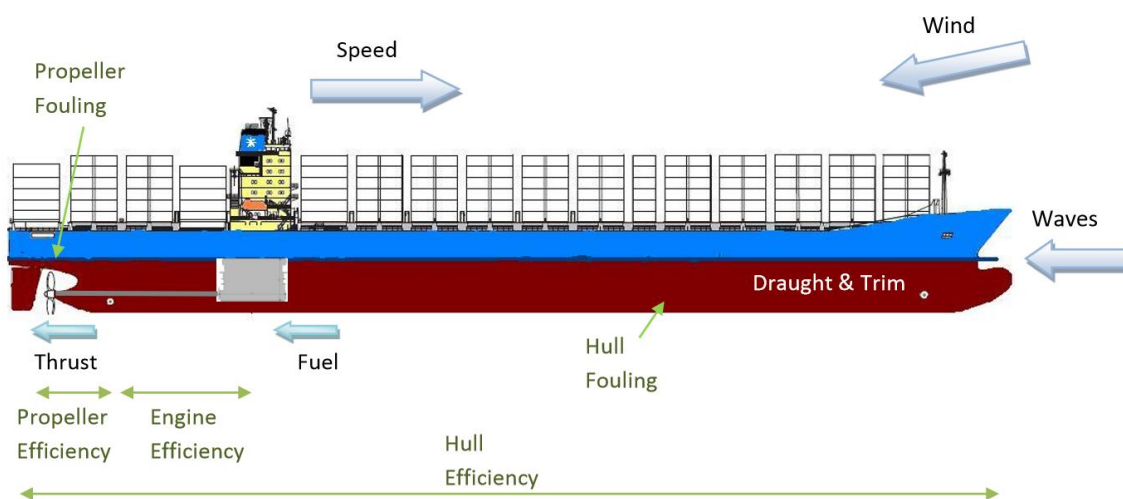
Οι σύγχρονες λύσεις διαχείρισης επιδόσεων στόλου παρέχουν εξελιγμένες υπηρεσίες συλλογής, παρουσίασης και ανάλυσης δεδομένων για την υποστήριξη της βέλτιστης λήψης αποφάσεων που βοηθά τους πλοιοκτήτες και τους φορείς εκμετάλλευσης να διαχειρίζονται καλύτερα τις επιδόσεις των στόλων και των πλοίων. Αυτό επιτυγχάνεται με μια απλή προσέγγιση σε τέσσερα βήματα: Σχεδιασμός, Δράση, Έλεγχος, Ανάλυση.



Εικόνα 2.22: Ο κύκλος Σχεδιασμού - Δράσης - Ελέγχου - Ανάλυσης

Στην καλύτερη περίπτωση, η διαχείριση επιδόσεων του στόλου μπορεί να οδηγήσει σε βελτίωση της απόδοσης έως και 38%.

Στις μέρες μας, υπάρχει μεγάλη πληθώρα διαθέσιμων συστημάτων αξιολόγησης της απόδοσης ενός πλοίου στην αγορά, με διαφορετικές προσεγγίσεις το καθένα όσον αφορά τον τρόπο ανάκτησης, αποθήκευσης και ανάλυσης των διαθέσιμων δεδομένων. Τα περισσότερα συστήματα στο παρελθόν είχαν ως βάση τους τις μεσημβρινές αναφορές ημερολογίου (noon reports), τα οποία αποστέλλονται σε καθημερινή βάση από το πλήρωμα του πλοίου προς τη διαχειρίστρια εταιρεία. Πιο σύγχρονες υλοποιήσεις αξιοποιούν τη χρήση δεδομένων πραγματικού χρόνου (live data), τα οποία αποστέλλονται αυτόματα από τους αισθητήρες μέσω δορυφόρων χωρίς ανθρώπινη επέμβαση, γεγονός που αυξάνει τόσο την αξιοπιστία τους, όσο και την ακρίβεια των μετρήσεων. Υπάρχουν, επιπλέον, υβριδικά συστήματα αξιολόγησης που κάνουν χρήση τόσο καταγραφόμενων όσο και αυτοματοποιημένων δεδομένων. Τέλος, ένας περιορισμένος αριθμός συστημάτων συνδυάζει την αξιολόγηση της απόδοσης του πλοίου με την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής (weather routing).



Εικόνα 2.23: Περιγραφή παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη από ένα σύγχρονο σύστημα αξιολόγησης απόδοσης πλοίου [10]

Παρότι υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι πλοιοκτήτες θεωρούν τα συστήματα αυτά ως «μαύρα κουτιά», διότι δεν τους είναι σαφής ούτε ο τρόπος συλλογής των δεδομένων ούτε η μέθοδος ανάλυσής τους, η επόμενη λίστα περιλαμβάνει ενδεικτικά – και σε καμία περίπτωση πλήρως – ορισμένα από τα διαθέσιμα συστήματα παρακολούθησης της ενεργειακής απόδοσης ενός πλοίου που χρησιμοποιούνται ευρέως στην αγορά:

- **LAROS** (βραβείο Lloyd's για τεχνικά επιτεύγματα): Σύστημα ασύρματης παρακολούθησης και ανάλυσης της απόδοσης, που επιτρέπει την ανάλυση όλων των κρίσιμων λειτουργιών του πλοίου σε πραγματικό χρόνο. Το σύστημα μπορεί να συνδεθεί με οποιοδήποτε σημείο ενδιαφέροντος ανεξάρτητα από την ηλικία, το μέγεθος ή τον τύπο του πλοίου. [22]
- **CASPER (Propulsion Dynamics)**: Ανάλυση καθημερινών καταγραφών επί του πλοίου. Περιοδικές αναφορές στέλνονται στη στεριά για περαιτέρω ανάλυση. Γίνεται διόρθωση για τις συνθήκες ανέμου και κυματισμού. [23]
- **DNV GL Eco Insight**: Η πύλη ECO Insight αποτελείται από 5 ενότητες που παρέχουν μια ολοκληρωμένη εικόνα της απόδοσης του στόλου. Το προαιρετικό σύστημα καταγραφής δεδομένων αντικαθιστά τις υπάρχουσες διεργασίες πλοίου-ξηράς και εξασφαλίζει υψηλή ποιότητα δεδομένων μέσω ελέγχων αξιοπιστίας. [24]

- **BMT Smart:** Αρθρωτό σύστημα που παρέχει την ευελιξία που απαιτείται για την κάλυψη των επιμέρους απαιτήσεων των πλοίων. Η αρθρωτή φύση της λύσης καθιστά εφικτή την αξιοποίησή του σε κάθε επιμέρους εγκατάσταση, από τη βασική έως την πιο σύνθετη, με δυνατότητα κλιμάκωσης του υλικού ανάλογα με τον αριθμό εισόδων από τους αισθητήρες. [25]
- **KYMA AS:** Επιτρέπει τη συλλογή και ανάλυση δεδομένων πραγματικού χρόνου επί του πλοίου. [26]
- **Propulsion Analytics:** Αναλύοντας τα δεδομένα ρουτίνας που συλλέγονται από τα πλοία και συγκρίνοντάς τα με ένα προσαρμοσμένο «ψηφιακό δίδυμο» του κινητήρα μπορεί να παρέχει την απόδοσή του σε οποιαδήποτε δεδομένη κατάσταση, να εξάγονται και να εμφανίζονται σημαντικές πληροφορίες, όπως δείκτες απόδοσης, γραφήματα/τάσεις, σφάλματα/ειδοποιήσεις, αποτυπώνοντας έτσι την κατάσταση των κινητήρων του στόλου και παρέχονται διαγνωστικά, προγνωστικά, συμβουλές βελτιστοποίησης και πληροφορίες για τον καλύτερο προγραμματισμό της συντήρησης του πλοίου με βάση την εκτίμηση της κατάστασης. [27]

## 2.5 Καταγραφή καλών πρακτικών

Η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας είναι μία συνεχής διαδικασία και εξαρτάται από διάφορα τεχνικά και λειτουργικά ζητήματα, από τον ανθρώπινο παράγοντα, καθώς και πολλά άλλα. Χωρίς να καλύπτει όλες τις εναλλακτικές καλές πρακτικές που μπορούν να ακολουθούνται προκειμένου να επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας στα πλοία, η ακόλουθη λίστα συνοψίζει τις ενέργειες που ακολουθούνται ευρέως στις μέρες μας από τους ειδήμονες στον Ναυτιλιακό τομέα για την εξοικονόμηση ενέργειας στα πλοία τους [6]:

- Από τεχνικής άποψης:
  - Βελτιστοποίηση συστήματος πρόωσης με μείωση ταχύτητας
  - Συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας
  - Εξοπλισμός ελέγχου αποδοτικότητας
- Από λειτουργικής άποψης:
  - Σχεδιασμός ταξιδιού, ειδικά με τη μείωση της ταχύτητας, ικανοποιώντας ταυτόχρονα τις απαιτήσεις του ναυλοσύμφωνου
  - Προγραμματισμός εργασιών επισκευής και συντήρησης
  - Κατάσταση φόρτωσης, διαγωγή πλοίου, περιορισμός ταξιδιών υπό κατάσταση ερματισμού (ballast condition)

Μερικά από τα μέτρα που λαμβάνονται σήμερα από τους ειδικούς στον τομέα της Ναυτιλίας για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας στα πλοία περιγράφονται κατωτέρω.

### **Βελτιστοποίηση ταξιδιού**

Η κατανάλωση του καυσίμου είναι ανάλογη με την ταχύτητα υψωμένη στον κύβο. Ακόμη και μία μικρή μείωση της ταχύτητας επηρεάζει σημαντικά την κατανάλωση του καυσίμου και τις εκπομπές αερίων. Σύμφωνα με τη μελέτη IMO GHG Study [28], σχετικά με τις εκπομπές αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου, εάν η ταχύτητα μειωθεί κατά 10%, ο χρόνος που απαιτείται για το ταξίδι θα αυξηθεί αλλά η συνολική κατανάλωση καυσίμου θα μειωθεί κατά 23,3%. Οι μεθοδολογίες άφιξης Just-In-Time ή Virtual Arrival, παρότι προϋποθέτουν την άριστη επικοινωνία μεταξύ των ναυλωτών, του πλοιάρχου, των λιμενικών αρχών και των ναυτιλιακών πρακτόρων, μπορούν να επιφέρουν σημαντική εξοικονόμηση κόστους, χρόνου και εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και να βελτιώσουν τις συνθήκες ασφάλειας και διαχείρισης των λιμένων.

Εκτός από τη βέλτιστη προσαρμογή της ταχύτητας, στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται, μεταξύ άλλων, και ο κατάλληλος σχεδιασμός του δρομολογίου του πλοίου, χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία Great Circle [29], προκειμένου να βρεθεί η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο γεωγραφικών στιγμάτων, καθώς και η αξιοποίηση των μετεωρολογικών συνθηκών, π.χ. άνεμος, θαλάσσια ρεύματα κ.ά. (weather routing) προς όφελος της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου.

Επίσης, αξιοσημείωτη εξοικονόμηση στην κατανάλωση καυσίμου επιτυγχάνεται με τη χρήση Autopilot κατά την πλεύση σε ανοιχτή θάλασσα και ανάλογα με τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες, αφού μικρότερες και σπανιότερες διορθώσεις στην πορεία του πλοίου έχουν ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση των απωλειών εξαιτίας της αντίστασης στο πηδάλιο.

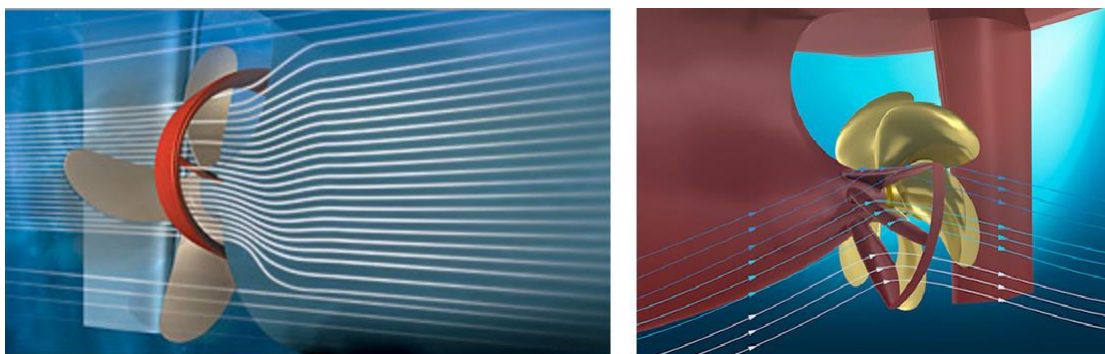
Ακόμη, η συνολική αντίσταση του κύτους μέσα στο νερό μεταβάλλεται ανάλογα με το βύθισμα και τη διαγωγή του πλοίου. Εκτός από τις γενικές αρχές του να βρίσκεται πάντα βυθισμένη η βολβοειδής πλώρη και να μην βρίσκεται η έλικα πολύ κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας, υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την εύρεση της βέλτιστης διαγωγής του πλοίου, από πιο εξεζητημένες μέχρι διαδικασίες πειραματισμού και σφάλματος (trial and error).



### Συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας

Τα συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας είναι συνήθως διαφορετικοί τύποι κατασκευών γύρω από την έλικα. Αρκετά από αυτά τα συστήματα έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια προκειμένου να μειώσουν τις απώλειες περιστροφής. Όταν η έλικα περιστρέφεται προκειμένου να παραχθεί η απαιτούμενη ώθηση, η ροή του νερού αποκτά μία περιστροφή η οποία συνήθως προκαλεί περίπου 10% με 15% απώλεια ισχύος. Με την επιβολή της περιστροφής προς την αντίστροφη κατεύθυνση, κάποιο ποσοστό απωλειών μπορεί να ανακτηθεί.

Συνηθισμένα συστήματα περιλαμβάνουν περύγια μπροστά από την έλικα και ελικοειδή πηδάλια. Άλλα συστήματα αποσκοπούν στη δημιουργία μίας πιο ομοιόμορφης ροής στην έλικα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω συσκευών μπροστά από την έλικα. Η τοποθέτηση “Mewis duct” και “pre-swirl stator” είναι αρκετά δημοφιλής, με αξιοσημείωτα ποσά εξοικονόμησης σε ορισμένες περιπτώσεις.



Εικόνα 2.24: Mewis duct (αριστερά) και Pre-swirl stator (δεξιά) [30]

### Μηχανήματα

Για την παραγωγή ισχύος για την πρόωση του πλοίου υπάρχουν πλείστες διαθέσιμες τεχνολογίες. Η απόδοση μίας μηχανής είναι αποτέλεσμα ενός μεγάλου αριθμού παραμέτρων. Στα συστήματα ατμοστροβίλου η απόδοση κυμαίνεται από 25% έως 30% ενώ σε εξελιγμένες δίχρονες νηξελομηχανές η απόδοση μπορεί να ξεπεράσει το 50%. Η αξιοποίηση συστημάτων ανάκτησης θερμότητας μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση, φτάνοντας σύγχρονα συστήματα να αποδίδουν σήμερα σε ποσοστό από 56% έως και 58%.

Η επιλογή της μηχανής είναι συνισταμένη πολλών και ετερογενών παραγόντων, ωστόσο οι νηξελομηχανές είναι στις μέρες μας η κυρίαρχη τάση.

Εναλλακτικοί τύποι καυσίμου γίνονται όλο και περισσότερο διαδομένοι, με το LNG και τη μεθανόλη να αποτελούν μέχρι στιγμής την καλύτερη επιλογή, επιφέροντας μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>, και πιο σημαντικό σε ορισμένες περιπτώσεις τις εκπομπές SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> και των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.

Πέραν των ανωτέρω, στις καλές πρακτικές για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής αποδοτικότητας του πλοίου περιλαμβάνονται η σωστή και τακτική συντήρηση των μηχανημάτων, η επιλογή κατάλληλων αντιρρυπαντικών συστημάτων και ο επιμελής καθαρισμός του κύτους και της έλικας, ο έλεγχος της κατανάλωσης λιπαντικών, η κατάλληλη εκπαίδευση των ατόμων που κάνουν χρήση του μετρητικού εξοπλισμού, η χρήση Exhaust Gas Economizers για την ελαχιστοποίηση της λειτουργίας των boilers κ.ά.

Ο σπουδαιότερος, όμως, παράγοντας που βοηθά στην εξοικονόμηση καυσίμου είναι η *παρακολούθηση* της κατανάλωσης καυσίμου. Μόνο έτσι είναι δυνατή η επιβεβαίωση ή μη της βέλτιστης λειτουργίας του πλοίου βάσει της ενεργειακής του απόδοσης και η λήψη των απαιτούμενων και κατάλληλων μέτρων αντιμετώπισης προκειμένου να επιτευχθεί εξοικονόμηση καυσίμου. Είναι, βέβαια, σαφές ότι για να είναι εφικτή μία τέτοια ανάλυση, προϋποτίθεται η συλλογή όσο το δυνατόν περισσότερων στοιχείων κατά την πλεύση του πλοίου και στη συνέχεια η κατάλληλη επεξεργασία τους προκειμένου να εξάγονται συμπεράσματα για τον τρόπο και τις δυνατότητες βελτίωσης της λειτουργίας του πλοίου. Είναι προφανές ότι όσο πιο στενή είναι η παρακολούθηση του πλοίου τόσο η απόδοσή του βελτιστοποιείται.

## 2.6 Προκλήσεις για περαιτέρω έρευνα

Παρά τα πολλά υποσχόμενα οφέλη από τα εργαλεία διαχείρισης επίδοσης πλοίου και στόλου, στην πραγματικότητα φαίνεται πως δεν έχουν ακόμη τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Υπάρχει μία κοινή πεποίθηση στον ναυτιλιακό τομέα πως «ένα πλοίο αποδίδει καλά όσο δεν υπάρχουν διαμαρτυρίες σχετικά με την ταχύτητα και την κατανάλωση από τους ναυλωτές του» [31]. Τα αίτια μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- **Έλλειψη κατανόησης**

Σε μία πρώτη προσέγγιση, οι πλατφόρμες διαχείρισης στόλου φαίνονται ως μία απλή πρόταση. Στην πραγματικότητα όμως δεν είναι. Οι πλοιοκτήτες χρειάζονται την τεχνική εμπειρογνομosύνη και εξειδικευμένη υποστήριξη για να εξασφαλίσουν ότι τα εργαλεία διαχείρισης στόλου εξυπηρετούν τον σκοπό τους, αφού στην πραγματικότητα τα περισσότερα από αυτά δεν έχουν μία ολιστική

## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

προσέγγιστη στο θέμα της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου αλλά λαμβάνουν υπόψη μόνο επιλεκτικά κριτήρια αξιολόγησης.

- **Λανθασμένη επιχειρηματική στρατηγική**

Με τα εργαλεία παρακολούθησης στόλου συχνά να προωθούνται ως απλή λύση παρακολούθησης πλοίων που προσφέρουν δήθεν αυτόματα εξοικονόμηση πόρων οι πλοιοκτήτες αποτυγχάνουν να αναπτύξουν ισχυρές επιχειρησιακές στρατηγικές. Είναι ζωτικής σημασίας να συμπεριληφθεί το κόστος της συλλογής δεδομένων και της εσωτερικής διαχείρισης, και να αποφεύγεται η υπερβολική εκτίμηση των εξοικονομούμενων πόρων.

- **Ανεπαρκής συλλογή δεδομένων**

Οι πλατφόρμες διαχείρισης στόλου βασίζονται σε δεδομένα από ένα ευρύ φάσμα πηγών (συμπεριλαμβανομένου του καιρού και των υφιστάμενων εργαλείων συλλογής δεδομένων επί του πλοίου), καθώς και χειροκίνητη εισαγωγή δεδομένων από το πλήρωμα και το προσωπικό ξηράς. Η χρήση άγνωστων στους πλοιοκτήτες μαθηματικών τύπων σχετικών με τα μετεωρολογικά δεδομένα, οι ασυνέχειες στην καταγραφή και η μη σωστή λήψη όλων αυτών των δεδομένων έχει ως αποτέλεσμα ελλιπή εικόνα.

- **Ανεπαρκής ανάλυση δεδομένων**

Όλα τα δεδομένα που συλλέγονται πρέπει να ποσοτικοποιηθούν, να πιστοποιηθούν και να επαληθευτούν. Σε συνδυασμό με την ελλιπή ακρίβεια που ενδεχομένως να χαρακτηρίζει τον μεγαλύτερο όγκο των δεδομένων, ιδιαίτερος για τα ωκεανογραφικά δεδομένα, των οποίων η συλλογή και ανάλυση είναι σε σχετικά αρχικό στάδιο, είναι προφανές πως η διαδικασία αυτή απαιτεί χρόνο και μεγάλη επένδυση κεφαλαίου. Επιπλέον, η έλλειψη διαφάνειας της βιομηχανίας εργαλείων διαχείρισης στόλου στερεί από τους πλοιοκτήτες την κατανόηση που χρειάζονται.

Σημαντικά οφέλη μπορούν ασφαλώς να επιτευχθούν, αλλά μόνο με το χρόνο, τις επενδύσεις και τη συνεργασία μεταξύ όλων των ενδιαφερόμενων μερών, διαφορετικά μάλλον επιπλέον δαπάνες θα επιβαρύνουν τον πλοιοκτήτη αντί να επιτευχθεί πραγματική εξοικονόμηση πόρων.



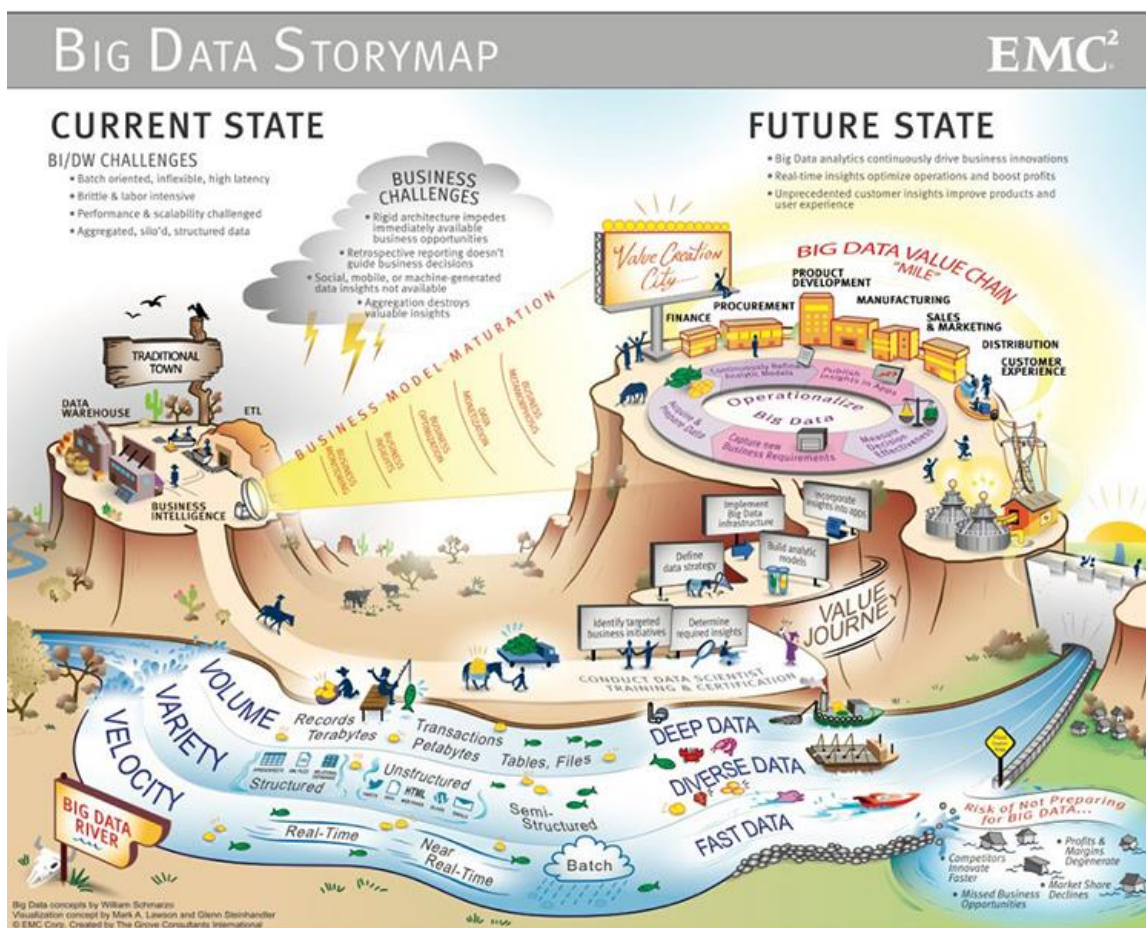
### **3 Δεδομένα, μετρήσεις και ανάλυση**

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει παραγωγή τεράστιου όγκου δεδομένων, τόσο δομημένων, όσο και αδόμητων, τα οποία μεταξύ άλλων, αφορούν διαδρομές πλοίων, καιρικές συνθήκες, θαλάσσιες συνθήκες κ.ά. Στο πλαίσιο αυτό, δημιουργείται η πρόκληση τα δεδομένα αυτά να συγκεντρώνονται και να αναλύονται κατάλληλα με σκοπό να παραχθεί νέα γνώση και να δημιουργηθούν καινοτόμες υπηρεσίες, οι οποίες θα προσφέρουν αξία στους διαφορετικούς εμπλεκόμενους με τη θάλασσα και τη ναυτιλία φορείς.

Οι δραστηριότητες του ανθρώπου εντός του θαλάσσιου περιβάλλοντος καλύπτουν όλα τα χαρακτηριστικά που ορίζουν τα δεδομένα μεγάλης κλίμακας. Ο όγκος είναι τεράστιος, η ταχύτητα που παράγονται τα δεδομένα είναι πολύ υψηλή λόγω αυτού του όγκου, υπάρχει μεγάλη ποικιλία ως προς τη φύση και τη δομή, λόγω του πλήθους των διαφορετικών δραστηριοτήτων και των δεδομένων που διαχειρίζονται έκαστα, η μεταβλητότητα και η ποιότητα αλλάζουν συνεχώς με την εξέλιξη της τεχνολογίας και την ανάγκη εξεύρεσης νέων μεθόδων, ενώ η αξία είναι τεράστια καθώς το θαλάσσιο περιβάλλον και κατ' επέκταση οι δραστηριότητες και τα δεδομένα που παράγονται από αυτές έχουν καθοριστικό ρόλο στην ανάλυση της κατανάλωσης καυσίμου στα πλοία.

#### **3.1 Δεδομένα μεγάλης κλίμακας**

Συνήθως τα πολύπλοκα ζητήματα είναι ευκολότερο να εξηγηθούν και να κατανοηθούν μέσα από τη χρήση αναλογιών. Τα δεδομένα μεγάλης κλίμακας δεν αποτελούν εξαίρεση. Η ακόλουθη εικόνα αποτυπώνει το μεγάλο ταξίδι των δεδομένων μέσω απλουστευμένων αναλογιών.



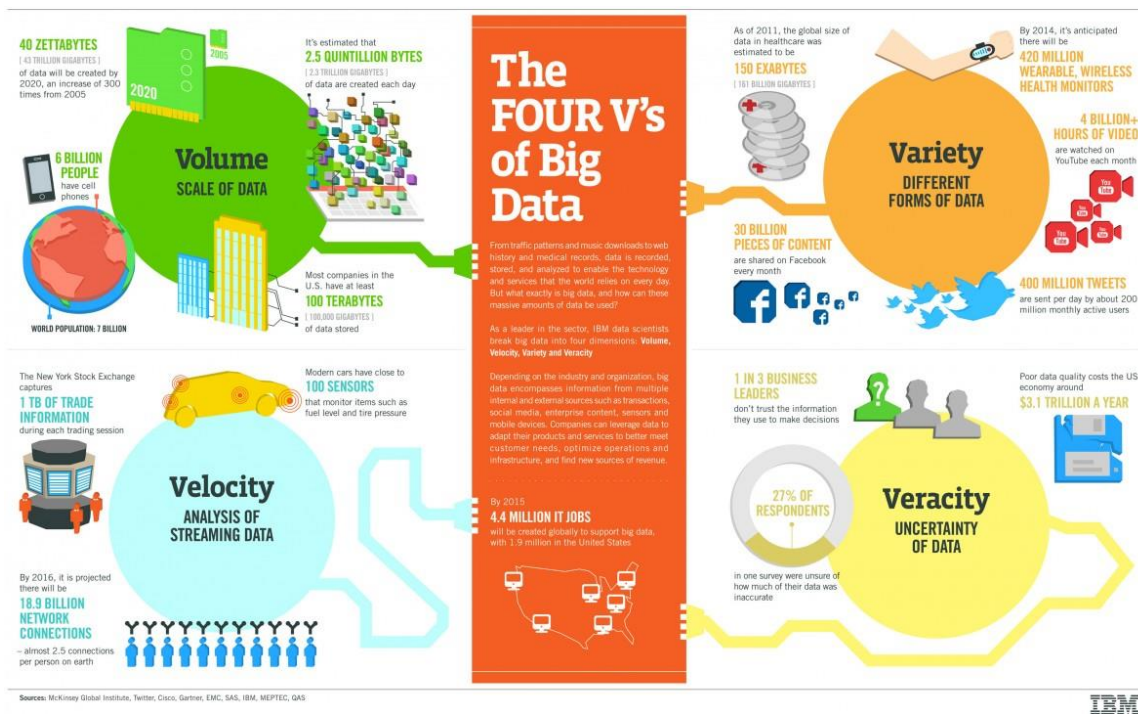
Εικόνα 3.1: Μεγάλοι όγκοι δεδομένων, δομημένων ή μη, όπως το νερό, κινούνται συνέχεια. Πλήθος από εσωτερικές ή εξωτερικές πηγές, που κυκλοφορούν με μικρές ή μεγάλες ταχύτητες, μπορούν να διανθίσουν τους κήπους ή να καταποντίσουν τους απροετοίμαστους στην εποχή των νέων δεδομένων. Απαιτούνται κατάλληλες υποδομές εισαγωγής, διαχείρισης, ανάλυσης και πρόβλεψης των νέων δεδομένων προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμες πληροφορίες για τους τελικούς χρήστες. [32]

Ο όρος «δεδομένα μεγάλης κλίμακας» έχει γίνει αρκετά δημοφιλής τα τελευταία χρόνια. Οι βιομηχανίες προσαρμόζουν το επιχειρηματικό τους πλάνο σε πιο ψηφιοποιημένα μοντέλα. Μέσω της ανάλυσης δεδομένων μεγάλης κλίμακας, οι επιχειρηματίες μπορούν να μετρήσουν, και επομένως να γνωρίζουν, αυτομάτως ολόένα και περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις επιχειρήσεις τους, και κατά συνέπεια μπορούν να αξιοποιήσουν αυτήν τη γνώση ώστε να οδηγούνται στη λήψη βελτιωμένων αποφάσεων σχετικά με την απόδοση των επιχειρήσεων που διοικούν. Η ανάλυση δεδομένων μεγάλης κλίμακας οδηγεί στην επιχειρηματική ευφυΐα και κατά συνέπεια σε επιχειρηματικά κέρδη.

## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

Σύμφωνα με τον Λόρδο Κέλβιν, «το να μετράς σημαίνει να γνωρίζεις. Εάν δεν μπορείς να μετρήσεις κάτι, δεν μπορείς να το βελτιώσεις». Η ανάλυση μεγάλων δεδομένων είναι βασισμένη στα ακόλουθα χαρακτηριστικά, ευρέως γνωστά ως “4 V’s” [33]:

- **Όγκος (Volume):** Το πλήθος των δεδομένων που έχουν δημιουργηθεί και αποθηκευθεί προς ανάλυση
- **Ποικιλία (Variety):** Ο τύπος και η φύση των δεδομένων μπορεί να διαφέρει σημαντικά
- **Ταχύτητα (Velocity):** Η ταχύτητα με την οποία τα δεδομένα παράγονται καθώς και η συχνότητα με την οποία αυτά υφίστανται επεξεργασία από τους αναλυτές
- **Αξιοπιστία (Veracity):** Η ποιότητα των δεδομένων μπορεί να διαφέρει κατά πολύ, επηρεάζοντας έτσι δραστικά την αξιοπιστία των εξαγόμενων συμπερασμάτων



Εικόνα 3.2: Τα 4 V's των μεγάλων δεδομένων [34]

### 3.2 Συλλογή δεδομένων

Τα στοιχεία που μπορεί να έχει μία ναυτιλιακή εταιρεία στη διάθεσή της για την απόδοση των πλοίων της είναι οι μεσημβρινές αναφορές ημερολογίου (noon reports), οι οποίες παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία των πλοίων σε ημερήσια βάση, αλλά και δεδομένα πραγματικού χρόνου (live data) τα οποία προέρχονται από συστήματα επικοινωνίας, τηλεματικής μέσω δορυφόρων (Inmarsat).

Ανάλογα με την ποιότητα και την ποσότητα των δεδομένων που συλλέγονται, μπορούν να γίνουν εκτιμήσεις για την κατάσταση του πλοίου, τις ανάγκες καθαρισμού του κύτους και της έλικας, καθώς και εργασίες συντήρησης ή επισκευής προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η απόδοση της μηχανής του.

Η ποιότητα και η αξιοπιστία των δεδομένων που συλλέγονται προς ανάλυση είναι θεμελιώδους σημασίας για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Για αυτόν τον λόγο, είναι απαραίτητος ο τακτικός έλεγχος όλων των συστημάτων μέτρησης και καταγραφής προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ορθή λειτουργία τους. Οι δοκιμές θα πρέπει να περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, τη βαθμονόμηση των οργάνων και τον έλεγχο των μετρήσεων σχετικά με:

- Ροπή άξονα
- Ταχύτητα άξονα έλικας
- Διαφορικά συστήματα παγκόσμιου εντοπισμού θέσης
- Γυροπυξίδες
- Ανεμόμετρα
- Βήμα έλικας (για κάθε έλικα)
- Σύστημα μέτρησης βυθίσματος
- Σύστημα βυθομέτρησης

Είναι επίσης σημαντικό να προσδιορίζονται σωστά οι ενδείξεις των γραμμών φόρτωσης, η θερμοκρασία του νερού και η ειδική πυκνότητα.

Πιο συγκεκριμένα, τα δεδομένα που πρέπει να τηρούνται **πριν** την καταγραφή οποιασδήποτε μέτρησης σχετικά με την απόδοση του πλοίου είναι τα εξής:

- Προσδιορισμός θέσης του πλοίου (συντεταγμένες γεωγραφικού μήκους/πλάτους)
- Καιρικές συνθήκες
- Θερμοκρασία νερού και πυκνότητα
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος
- Κατακόρυφη θέση του ανεμόμετρου επάνω από την ίσαλο γραμμή



## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

- Βύθισμα στην πλώρη, την πρύμνη και το μέσο του πλοίου
- Εκτόπισμα, υπολογισμένο από το ύψος των βυθισμάτων
- Διαγωγή, υπολογισμένη από το ύψος των βυθισμάτων
- Εγκάρσια προβαλλόμενη περιοχή πάνω από την ίσαλο γραμμή, συμπεριλαμβανομένων των υπερκατασκευών
- Ύψος υπερκατασκευών

Για την επιβεβαίωση της ορθής καταγραφής της ταχύτητας του ανέμου, ενδείκνυται η καταγραφή της απόλυτης τιμής και της κατεύθυνσης από έναν χερσαίο μετεωρολογικό σταθμό. Αξίζει επιπλέον να αναφερθεί ότι ένας μεγάλος όγκος στατιστικών δεδομένων και ανάλυσης του καιρού γίνεται από ωκεανογραφικές υπηρεσίες (Αγγλικό ναυαρχείο, παράκτιους σταθμούς, εταιρείες weather routing κ.λπ.). Αυτές δίνουν δεδομένα που χρησιμοποιούνται ως φίλτρα στην ανάλυση και διόρθωση της απόδοσης.

Κατά τη **διάρκεια** των μετρήσεων που γίνονται για τον έλεγχο της απόδοσης του πλοίου, θα πρέπει να τηρούνται τα ακόλουθα δεδομένα:

- Ημερομηνία
- Ωρα
- Χρόνος πλεύσης
- Κατεύθυνση πλοίου
- Μέτρηση ταχύτητας επί εδάφους
- Σχετική ταχύτητα ανέμου και κατεύθυνση, βάσει του ανεμόμετρου
- Περίοδος μέσου κυματισμού (wave), ύψος κυματισμού και κατεύθυνση
- Περίοδος μέσου υποεπιφανειακού κυματισμού (swell), ύψος κυματισμού και κατεύθυνση
- Μέσο ύψος βυθού

Τα συστήματα παρακολούθησης και καταγραφής των μετρήσεων θα πρέπει να επιτρέπουν:

- Την αποθήκευση του μέγιστου διαθέσιμου όγκου δεδομένων από τις παραμέτρους που προαναφέρθηκαν
- Την επανάληψη των μετρήσεων σε τακτά χρονικά διαστήματα, ιδανικά κάθε 15’’
- Τον υπολογισμό στατιστικών δεδομένων (μέση ελάχιστη τιμή, μέγιστη και τυπική απόκλιση)

Στο τέλος κάθε κύκλου καταγραφής των μετρήσεων, το σύστημα παρακολούθησης θα πρέπει να παρέχει όλη την πληροφορία που έχει αποθηκευθεί τόσο σε μορφή πινάκων όσο

## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

και σε γραφική απεικόνιση, ώστε να είναι εύκολη η αξιολόγησή τους, τόσο ως προς την ποιότητα όσο και ως προς τη συνοχή των δεδομένων, έτσι ώστε να είναι δυνατή η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με την απόδοση του πλοίου.

Η ορθή ανάλυση των δεδομένων κατά τη διάρκεια των δοκιμών παραλαβής (sea trials), σύμφωνα με το ISO 15016/2015, “Ships and marine technology – Guidelines for the assessment of speed and power performance by analysis of speed trial data”, θα πρέπει να αποτελείται από τα εξής:

- Αξιολόγηση παρεχόμενων δεδομένων
- Διόρθωση της ισχύος λόγω αύξησης της αντίστασης εξαιτίας του ανέμου και του κυματισμού
- Διόρθωση της ισχύος λόγω της θερμοκρασίας του θαλάσσιου ύδατος και της πυκνότητάς του
- Διόρθωση της ταχύτητας του πλοίου λόγω της επίδρασης του ρεύματος
- Διόρθωση της ταχύτητας του πλοίου λόγω της επίδρασης ρηχών υδάτων
- Διόρθωση της ισχύος λόγω του εκτοπίσματος
- Παρουσίαση αποτελεσμάτων μελέτης απόδοσης πλοίου

### 3.2.1 Μέθοδοι μέτρησης

Τα δεδομένα που συλλέγονται προς επεξεργασία διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- **Αυτοματοποιημένα**, εκείνα τα δεδομένα δηλαδή που προέρχονται από ηλεκτρονικά συστήματα παρακολούθησης και μετρήσεων
- **Μέσω καταγραφών**, όπου η πληροφορία σημειώνεται σε ένα φύλλο καταγραφών από τον άνθρωπο/ναυτικό

Αξίζει να σημειωθεί ότι η τάση είναι στις μετρήσεις να μην επεμβαίνει ο άνθρωπος/ναυτικός έτσι ώστε να μην υπάρχει υπόνοια ηθελημένης αλλαγής των δεδομένων, να αυξάνει το επίπεδο ακρίβειας των μετρήσεων καθώς και να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα λαθών που οφείλονται στον ανθρώπινο παράγοντα. Στις μέρες μας, υπηρεσίες δορυφορικών επικοινωνιών, τηλεμετρίας, συλλογής και ανάλυσης δεδομένων καθιστούν δυνατή τη μελέτη ενός στόλου πλοίων, συνολικά, και όχι μεμονωμένα, καλύπτοντας ένα αρκετά ευρύ φάσμα παραμέτρων που επηρεάζουν την κατανάλωση του καυσίμου.

### **3.2.2 Ακρίβεια μετρήσεων**

Στα συστήματα παρακολούθησης υπεισέρχεται πάντοτε ένα περιθώριο σφάλματος στην ακρίβεια που προκύπτει από τα μετρητικά και τη μετάδοση της πληροφορίας.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [2], ο βαθμός αβεβαιότητας στις τιμές των μετρήσεων ορισμένων από τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του πλοίου φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα:

Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

Πίνακας 1: Παράμετροι και βαθμός αβεβαιότητας

(● = Χαμηλός, ●● = Μέτριος, ●●● = Υψηλός βαθμός αβεβαιότητας)

Παράμετρος	Μέτρηση και αβεβαιότητα	Βαθμός αβεβαιότητας
<b>Ταχύτητα ως προς τη θάλασσα</b>	Μεγάλη επίδραση από τα ωκεάνια ρεύματα και την κίνηση του πλοίου. Θα πρέπει να μετράται χρησιμοποιώντας καταγραφικό Doppler διπλού άξονα	●●●
<b>Ταχύτητα ως προς το έδαφος</b>	Μετράται χρησιμοποιώντας DGPS με ικανοποιητικά υψηλή ακρίβεια	●
<b>Ροπή</b>	Απαιτείται κατάλληλος αισθητήρας ροπής στον άξονα της έλικας. Ευαίσθητος εξοπλισμός, επιρρεπής σε αποκλίσεις που είναι δύσκολο να διαπιστωθούν. Απαιτείται συχνή βαθμονόμηση.	●●●
<b>Ταχύτητα μηχανής</b>	Υψηλή ακρίβεια, εύκολα προσδιοριζόμενη από ταχύμετρο το οποίο μετράει την περιστροφή του σφονδύλου με τη βοήθεια pick up sensors, τα οποία διαβάζουν την ταχύτητα περιστροφής με τη βοήθεια κενών ή δοντιών που υπάρχουν πάνω στον σφόνδυλο.	●
<b>Κατανάλωση καυσίμου</b>	Επηρεάζεται από την ποιότητα του καυσίμου, μεταβολές πίεσης στη ροή, διαρροές και επιστροφές καυσίμου. Η θέση του ροόμετρου είναι καθοριστικής σημασίας. Θα πρέπει να διορθώνεται βάσει ISO κάνοντας χρήση της πυκνότητας και της ελάχιστης θερμογόνου δύναμης	●

Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

<b>Χαρακτηριστικά καυσίμου</b>	Ελάχιστη θερμογόνος δύναμη και πυκνότητα από δείγματα καυσίμου. Μεταβολή των χαρακτηριστικών μπορεί να παρατηρηθεί λόγω αλλαγής της θερμοκρασίας έγχυσης.	•
<b>Ταχύτητα ανέμου και κατεύθυνση</b>	Η ένδειξη του ανεμόμετρου επηρεάζεται από τις στρεβλώσεις λόγω ανέμου. Η θέση του ανεμόμετρου είναι σημαντική.	••
<b>Κυματισμός</b>	Απαιτείται οπτική εκτίμηση του ύψους των κυμάτων και των υποεπιφανειακών κυμάτων (swell). Μεγάλες αποκλίσεις λόγω υποκειμενικών παρατηρήσεων. Η περιοδικότητα μπορεί να προσδιορίζεται από τα στατιστικά της κατάστασης της θάλασσας. Το φάσμα του κυματισμού από βάσεις δεδομένων, ανάλογα με την τοποθεσία.	••
<b>Βύθισμα και διαγωγή</b>	Μπορεί να προσδιοριστεί μόνο στο λιμάνι. Υπολογιστής φόρτωσης δεν ενδείκνυται.	••
<b>Βάθος νερού</b>	Είναι σημαντικό μόνο σε ρηγά ύδατα, περίπου <100μ. βάθους. Η χρήση echo sounder παρέχει ικανοποιητική ακρίβεια.	•
<b>Θερμοκρασία θαλασσινού νερού</b>	Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό μεταβολών στην πυκνότητα του θαλασσινού νερού.	•
<b>Κατάσταση έλικας</b>	Το επίπεδο ρύπανσης δεν μπορεί να ποσοτικοποιηθεί. Συγκριτική κλίμακα αξιολόγησης της παρούσας με προηγούμενη κατάσταση. Περιοδική επισκόπηση από δύτες.	••

### 3.3 Κριτήρια αξιολόγησης

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που εστάλησαν από 8 αδελφά φορτηγά πλοία από τη στιγμή της ναυπήγησής τους έως τον Ιανουάριο του 2018 (δηλαδή για διάστημα περίπου 7 ετών) μέσω των μεσημβρινών αναφορών ημερολογίου (noon reports), τα δεδομένα επίδοσης των πλοίων βάσει των δοκιμών παραλαβής (sea trials), καθώς και οι ημερομηνίες βελτιωτικών δράσεων επί του κύτους (δεξαμενισμοί, καθαρισμοί κύτους και έλικας). Οι τρεις μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία για την ανάλυση της μελέτης περίπτωσης ενός στόλου 8 αδελφών πλοίων (βλ. Κεφάλαιο 4) είναι οι εξής:

- **Σύγκριση της απόδοσης πλοίου εξελικτικά βάσει ιστορικών δεδομένων:** Ο βασικός στόχος του ελέγχου της ενεργειακής απόδοσης ενός πλοίου είναι η παροχή ανατροφοδότησης σχετικά με την απόδοσή του κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού ή για μία περίοδο του χρόνου ζωής του. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται εκτίμηση της απόδοσης του πλοίου όχι μόνο τη στιγμή της μέτρησης, αλλά αναδεικνύεται και η εξέλιξη της απόδοσής του για ένα χρονικό διάστημα, ανάλογα με τον χρονικό ορίζοντα των δεδομένων που τηρούνται προς επεξεργασία και ανάλυση.
- **Σύγκριση με αδελφά πλοία:** Μέσω της σύγκρισης της απόδοσης ενός πλοίου με αδελφά πλοία είναι εύκολο να προσδιοριστούν τυχόν διαφοροποιήσεις ως προς την ποιότητα και τη συχνότητα συντήρησής τους, αν δεν έχουν υποστεί διαφορές μετά την κατασκευή τους, προκειμένου να εξακολουθούν να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους.
- **Σύγκριση με δοκιμές παραλαβής (sea trials)<sup>2</sup>:** Η ποσοστιαία απόκλιση που προκύπτει από τη σύγκριση της ημερήσιας μέσης τιμής της ταχύτητας που καταγράφεται κατά τη διάρκεια του πλου με την αντίστοιχη θεωρητικά αναμενόμενη τιμή βάσει των δοκιμών παραλαβής (sea trials) αποτελεί έναν δείκτη αξιολόγησης της απόδοσης του πλοίου.

Άλλες προσεγγίσεις που ακολουθούνται στην πράξη για την αξιολόγηση της απόδοσης του πλοίου είναι η σύγκριση της πραγματικής του κατανάλωσης με την προσδοκώμενη τιμή

---

<sup>2</sup> Ιστορικά, οι δοκιμές παραλαβής (sea trials) λάμβαναν χώρα στο ναυπηγείο με σκοπό να επιβεβαιωθεί ότι η απόδοση του πλοίου πληροί τις προδιαγραφές που έχουν συμφωνηθεί μεταξύ ναυπηγείου και πλοιοκτήτη. Από το 2014 κι έπειτα, μετά τη σχετική οδηγία που εκδόθηκε από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (International Maritime Organization – IMO) για τον δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας (Energy Efficiency Design Index – EEDI), οι δοκιμές παραλαβής (sea trials) αποσκοπούν – μεταξύ άλλων – στη δημιουργία μιας διαφανούς και ενιαίας διαδικασίας αξιολόγησης της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων.

## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

που προκύπτει από διάφορες τεχνικές -κυρίως- μεθόδους ή δεδομένα που σχετίζονται με την αγορά, όπως:

- Δοκιμές κατασκευαστή (shop tests)
- Δοκιμές μοντέλου δεξαμενής (model tank tests)
- Υπολογισμοί δυναμικής ρευστών (Computational Fluid Dynamics – CFD)
- Ναυλοσύμφωνα (charter parties)

Το πλέον συνηθισμένο επίπεδο αναφοράς για την αξιολόγηση της απόδοσης του πλοίου είναι ο έλεγχος ταχύτητας/κατανάλωσης βάσει των δοκιμών παραλαβής (sea trials), του ιστορικού δεδομένων από προηγούμενα ταξίδια και η περιγραφή που έχει συμφωνηθεί στο ναυλοσύμφωνο. Ένας ακόμη ενδεδειγμένος δείκτης που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της κύριας μηχανής του πλοίου είναι η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC), το  $P_{max}$  και το  $P_{comp}$ .

Οι καμπύλες αναφοράς μπορεί να προέρχονται είτε από τις δοκιμές παραλαβής (sea trials) είτε από δοκιμές μοντέλου δεξαμενής και αφορούν τα κάτωθι:

- Ισχύς άξονα – στροφές
- Ισχύς άξονα – ταχύτητα πλοίου
- Ημερήσια κατανάλωση καυσίμου – ταχύτητα πλοίου
- Ειδική κατανάλωση καυσίμου – Ισχύς άξονα





## 4 Case Study – Μελέτη απόδοσης στόλου

### 4.1 Επισκόπηση του προβλήματος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να αναλύσει τους παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση του καυσίμου, τόσο μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης όσο και μέσω εφαρμογής μεθόδων στατιστικής ανάλυσης σε ένα σύνολο δεδομένων από πραγματικά ταξίδια 8 αδελφών φορτηγών πλοίων, έχοντας ως βάση κυρίως τις μεσημβρινές αναφορές ημερολογίου (noon reports), σε συνδυασμό όμως και με άλλους παράγοντες, όπως οι καθαρισμοί του κύτους και της έλικας, οι δεξαμενισμοί κ.ά.

### 4.2 Εξεταζόμενα πλοία

Τα πλοία που εξετάζονται είναι 8 αδελφά φορτηγά πλοία, 114.500 DWT, κατασκευασμένα στην Κίνα από το ναυπηγείο Shanghai Shipyard, στο διάστημα 2011-2014. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των υπό εξέταση πλοίων:

Πίνακας 2: Βασικά χαρακτηριστικά των υπό εξέταση πλοίων

Lenth over all	249,99 m
Length (P.P.)	240,00 m
Breadth (MLD)	43,00 m
Depth (MLD)	21,3 m
Scantling draft	15,0 m

## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

Volume (MLD), at d=15m	130.860,4 m <sup>3</sup>
------------------------	--------------------------

Τα στοιχεία της κύριας μηχανής φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

*Πίνακας 3: Βασικά χαρακτηριστικά κύριας μηχανής*

Type	MAN B&W 7S60MC-C7
Rated Power	15.820 kW
Rated speed	105 rpm
Number of cylinders	7
2,4 Stroke	2-stroke
Bore	600 mm
Stroke	2.400 mm
Crankshaft diameter	720 mm
Intermediate shaft diameter	525 mm

Επίσης, τα βασικά στοιχεία της έλικας συνοψίζονται παρακάτω:

Πίνακας 4: Βασικά χαρακτηριστικά έλικας

Diameter	7,48 m
Pitch	Fixed Pitch Propeller
Number of blades	4
Propeller speed	105 rpm

### 4.3 Διαθέσιμα δεδομένα

Τα δεδομένα που ήταν διαθέσιμα και λήφθηκαν υπόψη κατά την παρούσα μελέτη αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

#### **Μεσημβρινές αναφορές ημερολογίου (noon reports)**

Οι μεσημβρινές αναφορές ημερολογίου (noon reports) είναι μία αναφορά για την κατάσταση του πλοίου που καταγράφεται καθημερινά σε φύλλο δεδομένων. Τα δεδομένα παραδοσιακά καταγράφονταν χειροκίνητα για την κατάσταση του πλοίου στις 12:00 το μεσημέρι και κάθε φορά που το πλοίο κατέπλεε και απέπλεε προς/από τα λιμάνια και στέλνονταν έπειτα στον πλοιοκτήτη. Σήμερα, όμως, η καταγραφή αυτών των δεδομένων είναι δυνατή με τη βοήθεια μετρητών, χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση.

Στα υπό εξέταση πλοία, οι μεσημβρινές αναφορές ημερολογίου (noon reports) περιέχουν τα παρακάτω στοιχεία (έχουν ενσωματωθεί μέσω της πλατφόρμας εξαγωγής των δεδομένων και επιπλέον πληροφορίες, οι οποίες σημειώνονται με \*):

- Αριθμός ταξιδιού (\*)
- Κατάσταση φόρτωσης/ερματισμού
- Θέση του πλοίου (Λιμάνι/Ανοιχτή θάλασσα)
- Ημερομηνία και ώρα καταγραφής
- Τύπος αναφοράς (Μεσημβρινή/Αναχώρησης/Αφιξης/Σε λιμάνι)

## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

- Θέση του πλοίου, που λαμβάνεται μέσω GPS σε μορφή συντεταγμένων
- Απόσταση που καλύφθηκε από την προηγούμενη καταχώρηση
- Χρόνος πλεύσης από την προηγούμενη καταχώρηση
- Ένταση και κατεύθυνση ταχύτητας πλοίου
- Ολίσθηση
- Μέσες στροφές του άξονα
- Ένταση και κατεύθυνση ταχύτητας ανέμου
- Ένταση και κατεύθυνση ταχύτητας θαλάσσιων ρευμάτων
- Στοιχεία κατανάλωσης καυσίμων και λιπαντικών (\*)

Τα δεδομένα, πλην των μετεωρολογικών θεωρούνται ακριβή, καθώς καταγράφονται από μετρητές που έχουν μικρά περιθώρια σφάλματος. Η ισχύς στον άξονα, που είναι το πιο δύσκολο μετρήσιμο μέγεθος, μετράται με ροπόμετρο πάνω στον άξονα της μηχανής. Η μέση κατανάλωση του καυσίμου μετράται με ροόμετρο (flowmeter).

Αντίθετα, για τα μετεωρολογικά δεδομένα λαμβάνονται τιμές για την κατάσταση που επικρατεί κατά τη διάρκεια της μέτρησης και εκεί βρίσκεται η μεγαλύτερη περιοχή σφαλμάτων που μπορεί να παρουσιαστούν. Με δεδομένο ότι το πλοίο κατά τη διάρκεια της ημέρας μπορεί να έχει συναντήσει δυσμενέστερες ή ευνοϊκότερες καταστάσεις καιρού, δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη η αυξομείωση του καιρού και θεωρούνται σωστές οι τιμές που δεν αλλάζουν ραγδαία από τη μία μέρα στην άλλη.

### **Αναφορές δοκιμών παραλαβής (sea trial reports)**

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών παραλαβής (sea trials), οι συνθήκες του καιρού και της θάλασσας υπό τις οποίες διεξάγονται οι μετρήσεις είναι «ιδανικές»: μηδενική ταχύτητα ανέμου, μηδενικός κυματισμός, μηδενική ταχύτητα ρεύματος και θερμοκρασία θαλάσσιου νερού 15°C. Αλλά ακόμα κι αν δεν επικρατούν αυτές οι συνθήκες στην πραγματικότητα, γίνονται κατάλληλες διορθώσεις προκειμένου να αναχθούν όλες οι μετρήσεις σε αυτές τις «ιδανικές» συνθήκες. Κατά τη διάρκεια, όμως, της πραγματικής λειτουργίας του πλοίου, όπου είναι αδύνατον να επικρατούν αυτές οι συνθήκες αναφοράς, η ανάλυση και επεξεργασία των μετρήσεων που σχετίζονται με την ταχύτητα, την ισχύ και τις στροφές του άξονα της έλικας εξαρτώνται από τους εξής παράγοντες:

- Κατάσταση του πλοίου
  - Κατάσταση κύτους
  - Κατάσταση έλικας
  - Βύθισμα

## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

- Καιρικές συνθήκες
  - Ταχύτητα ανέμου
  - Κατεύθυνση ανέμου
- Συνθήκες θαλάσσης
  - Επίπεδο κυματισμού
  - Ταχύτητα ρεύματος
  - Κατεύθυνση ρεύματος
- Δεδομένα μετρήσεων
  - Διαθεσιμότητα
  - Ακρίβεια των μετρήσεων
  - Μέγεθος των ιστορικών δεδομένων που τηρούνται, για τη δημιουργία μιας καμπύλης αναφοράς και τη σύγκριση μελλοντικών μετρήσεων

Κατά συνέπεια, για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με την απόδοση του πλοίου είναι απαραίτητο να εξετάζονται όλοι οι ανωτέρω παράγοντες, να καταγράφονται και να τηρούνται ιστορικά δεδομένα, στον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό και να δίδεται ένα περιθώριο καιρού (sea margin).

Επίσης, είναι ενδεδειγμένη τακτική να προηγείται φιλτράρισμα των δεδομένων πριν την εφαρμογή οποιασδήποτε μελέτης τους, προκειμένου να αφαιρεθούν τυχόν ακραίες τιμές. Σύμφωνα με το κριτήριο του Chauvent, προτείνεται ο λόγος της μέγιστης απόκλισης που γίνεται αποδεκτή σε σχέση με τον δείκτη ακρίβειας και το πλήθος των καταγραφών. Έτσι, οι μετρήσεις που βρίσκονται έξω από το επιλεγμένο εύρος αποδεκτών τιμών απορρίπτονται και το σύνολο των ιστορικών δεδομένων που τηρείται περιλαμβάνει μόνο εξομαλυσμένες μετρήσεις. [35]

Τα αποτελέσματα των δοκιμών παραλαβής (sea trials) θεωρούνται αξιόπιστα και λαμβάνονται ως σημείο αναφοράς κατά τη διαχείριση του πλοίου. Από την αναφορά των δοκιμών παραλαβής, αντλούνται ακριβείς μετρήσεις για την ισχύ πρόωσης συναρτήσει των στροφών της έλικας και της ταχύτητας σε δεδομένα επίπεδα φόρτωσης.

### **Ημερομηνίες καθαρισμού κύτους και έλικας**

Για το χρονικό διάστημα όπου εξετάζεται η κατανάλωση καυσίμου στα 8 αδελφά πλοία, έχουν καταγραφεί όλες οι ημερομηνίες δεξαμενισμών αλλά και υποβρύχιων καθαρισμών του κύτους και της έλικας.

#### 4.4 Φιλτράρισμα δεδομένων

Το σύνολο των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη προέρχεται από την εξαγωγή ενός αρχείου τύπου excel από την πλατφόρμα επικοινωνίας ανάμεσα στο πλοίο και τον πλοιοκτήτη (“Danaos Ship Management Suite”). Στη συνέχεια, έγινε επεξεργασία των δεδομένων σε επίπεδο τέτοιο που να αίρει τις πολύ-μεταβαλλόμενες συνθήκες υπό τις οποίες αυτά ελήφθησαν: τα πλοία ταξιδεύουν υπό διάφορες συνθήκες καιρού, θαλάσσιου ρεύματος, τρόπου πλεύσης (κανονική πλοήγηση σε ανοιχτή θάλασσα, χειρισμοί μέσα σε λιμάνι κ.λπ.), επιπέδου φόρτωσης (με/χωρίς φορτίο) κ.λπ.

Τα χαρακτηριστικά των δεδομένων τα οποία εξαιρέθηκαν από την ανάλυση, προκειμένου να εξομαλυνθούν τυχόν ακραίες τιμές, συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

*Πίνακας 5: Δεδομένα από τα noon reports που εξαιρέθηκαν από την ανάλυση*

Παραμονή του πλοίου σε λιμάνι
Διάρκεια χειρισμών (manoeuvring) κατά την προσέγγιση σε λιμάνι ή τον απόπλου
Ταξίδι συνολικής διάρκειας μικρότερης των 48 ωρών
Απόκλιση από τις αναμενόμενες τιμές βάσει των δοκιμών παραλαβής (sea trials) μεγαλύτερη από 20%
Άλλες τυχόν ακραίες τιμές, που είναι καταφανώς μη ρεαλιστικές (π.χ. ένταση ανέμου μεγαλύτερη από 12 BF)

Επίσης, δεδομένου ότι κατά την ημέρα αναχώρησης ή άφιξης ή κατά τη μετάβαση του πλοίου από μία γεωγραφική περιοχή σε άλλη που έχουν διαφορετική ζώνη ώρας (time zone), ενδέχεται ο χρόνος πλεύσης να είναι διαφορετικός από 24 ώρες, έγινε αναγωγή όλων των καταναλώσεων σε 24ωρίες.

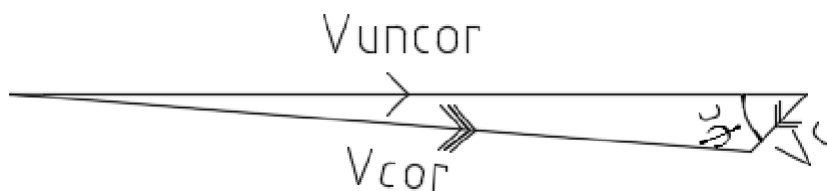
Μετά από το φιλτράρισμα των δεδομένων και τη διαχείριση των κενών και των ακραίων τιμών, το σύνολο των δεδομένων που έμειναν προς ανάλυση, και θεωρείται πως περιλαμβάνει αξιόπιστες πλέον τιμές, μειώθηκε στο 73% του αρχικού όγκου δεδομένων. Αυτό δεν σημαίνει απόλυτα ότι το 27% των δεδομένων που φιλτραρίστηκαν ανταποκρίνεται απαραίτητα σε λανθασμένες μετρήσεις, αλλά αντιστοιχεί σε πληροφορία που περισσότερο προκαλεί «θόρυβο» κατά την ανάλυση παρά οδηγεί στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων, για αυτόν τον λόγο και αφαιρέθηκε από την περαιτέρω μελέτη.

Σε συνέχεια των ανωτέρω, λοιπόν, οι παρατηρήσεις επάνω στις μετρούμενες και τις θεωρητικά αναμενόμενες τιμές των παραμέτρων που ελέγχονται θα πρέπει να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες που ίσχυαν κατά τη λήψη των πραγματικών μετρήσεων. Κατά συνέπεια, η ανάλυση των δεδομένων γίνεται για δύο υποσύνολα δεδομένων: ένα υποσύνολο περιλαμβάνει τις μετρήσεις που διεξήχθησαν σε συνθήκες καιρού με ένταση ανέμου χαμηλότερη από 5 Beaufort (BF) και το συμπληρωματικό του υποσύνολο που περιλαμβάνει μετρήσεις υπό συνθήκες «κακού» καιρού, δηλαδή ένταση ανέμου ίση ή μεγαλύτερη των 5 BF. Επιπλέον, γίνεται ξεχωριστή ανάλυση των δεδομένων που αφορούν πλοήγηση με ή χωρίς φορτίο.

Επίσης, έγινε διόρθωση της ταχύτητας λόγω παρουσίας θαλασσιών ρευμάτων (βλ. κεφάλαιο 4.5).

### 4.5 Διόρθωση της ταχύτητας λόγω παρουσίας θαλάσσιων ρευμάτων

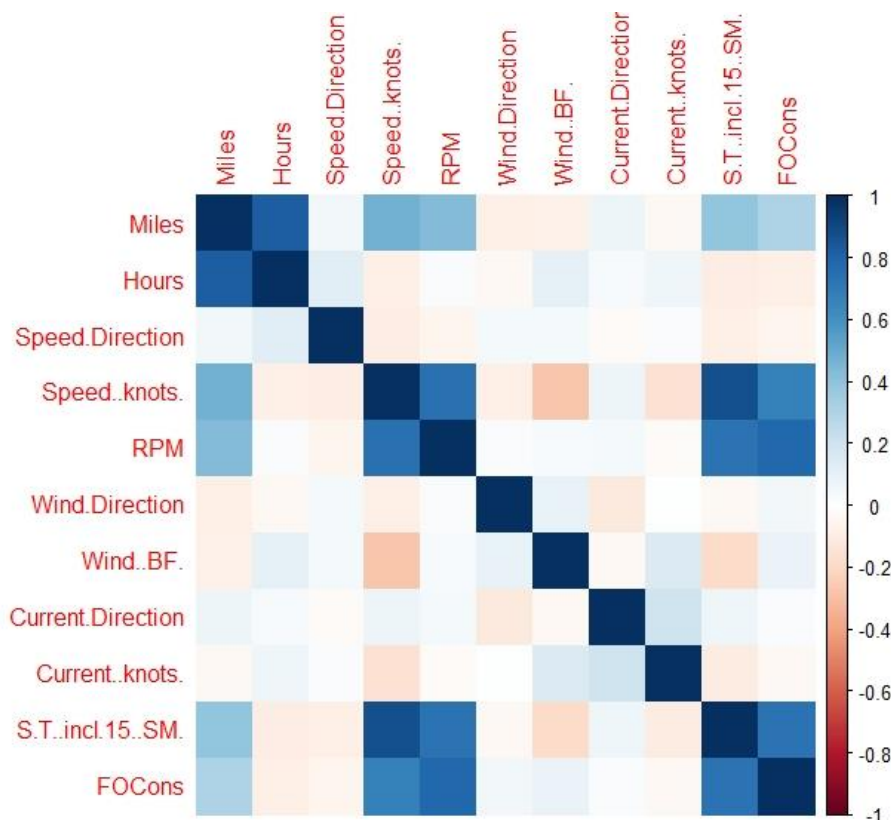
Η πραγματική ταχύτητα του πλοίου ως προς το νερό ( $V_{cor}$ ) υπολογίζεται ως διανυσματικό άθροισμα της ταχύτητας του ρεύματος ( $V_c$ ) και της ταχύτητας του πλοίου ως προς το έδαφος ( $V_{uncor}$ ), όπως φαίνεται και στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 4.1: Διόρθωση της ταχύτητας του πλοίου λόγω παρουσίας θαλάσσιων ρευμάτων

## 4.6 Ανάλυση δεδομένων

Με τη βοήθεια της γλώσσας προγραμματισμού R και το περιβάλλον στατιστικής ανάλυσης και γραφικών που προσφέρει, προέκυψε ο ακόλουθος πίνακας συσχέτισης των μεταβλητών που επηρεάζουν την κατανάλωση του καυσίμου. Όπως φαίνεται και στον ακόλουθο πίνακα, όπου συνοψίζονται οι συσχετίσεις μεταξύ των μεταβλητών της ανάλυσης, η κατανάλωση του καυσίμου σχετίζεται κυρίως με την ταχύτητα του πλοίου και τα δεδομένα αναφοράς βάσει των δοκιμών παραλαβής (sea trials).



Εικόνα 4.2: Πίνακας συσχέτισης μεταβλητών που επηρεάζουν την κατανάλωση καυσίμου

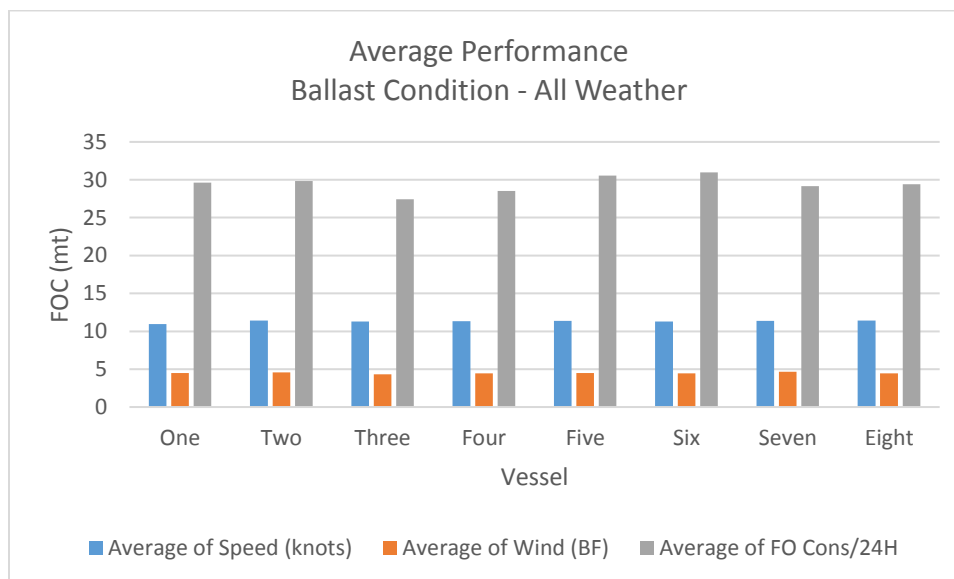
Στη συνέχεια, λοιπόν, γίνεται σύγκριση των 8 αδελφών πλοίων μεταξύ τους, από όπου παρατηρούμε τα εξής:

Σε κατάσταση **ερματισμού**, όλα τα πλοία του στόλου ταξίδευαν με μέση ταχύτητα περίπου 11,3 κόμβους, η ένταση του ανέμου ήταν κατά μέσο όρο περίπου 4,5 BF και είχαν μέση ημερήσια κατανάλωση 29,4 τόνους πετρελαίου. Η μέση τυπική απόκλιση για καθεμία από τις παραπάνω παραμέτρους, η οποία αποτελεί ένα μέτρο της διασποράς των τιμών του

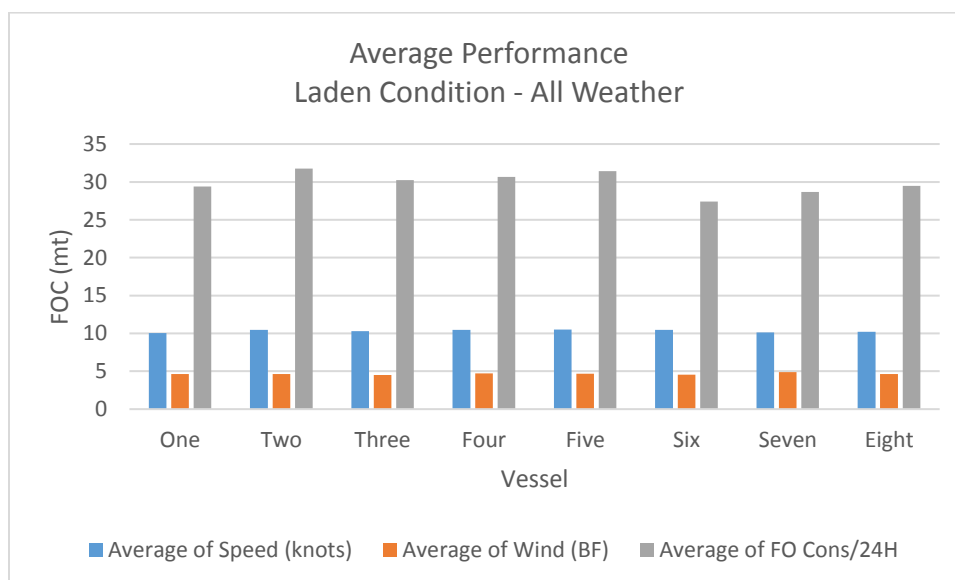


## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

δείγματος σε σχέση με την τιμή του μέσου όρου (αριθμητικού μέσου) είναι, αντίστοιχα, 0,1 κόμβοι για την ταχύτητα, 0,1 BF για τον άνεμο και 1,1 τόνοι πετρελαίου για την κατανάλωση. Πράγματι, από το ακόλουθο γράφημα παρατηρούμε ότι και τα 8 αδελφά πλοία έχουν παρόμοια απόδοση και βρίσκονται σε παρόμοιες καιρικές συνθήκες.



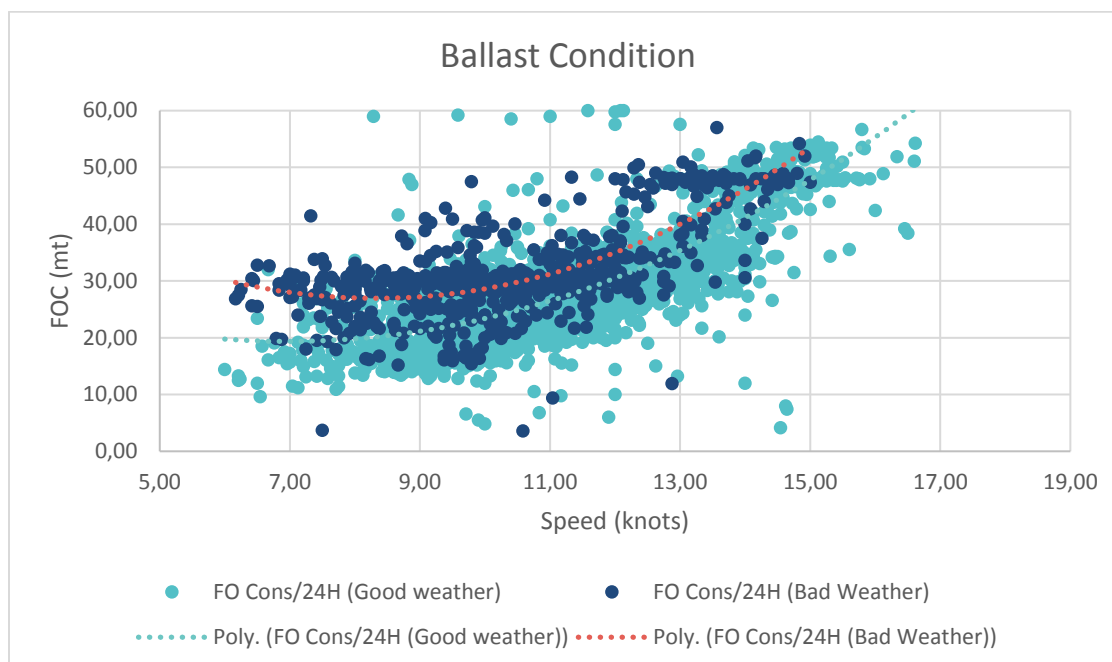
Αντίστοιχα, σε **κατάσταση φόρτωσης**, η μέση τιμή της ταχύτητας του πλοίου, της έντασης του ανέμου και της ημερήσιας κατανάλωσης είναι (εντός παρενθέσεως η τυπική απόκλιση για την κάθε παράμετρο): 10,3 κόμβοι ( $\pm 0,2$ ), 4,7BF ( $\pm 0,1$ ) και 29,9 τόνοι ( $\pm 1,4$ ). Η σύγκριση των επιδόσεων των 8 πλοίων σε κατάσταση φόρτωσης φαίνεται και στο ακόλουθο γράφημα:



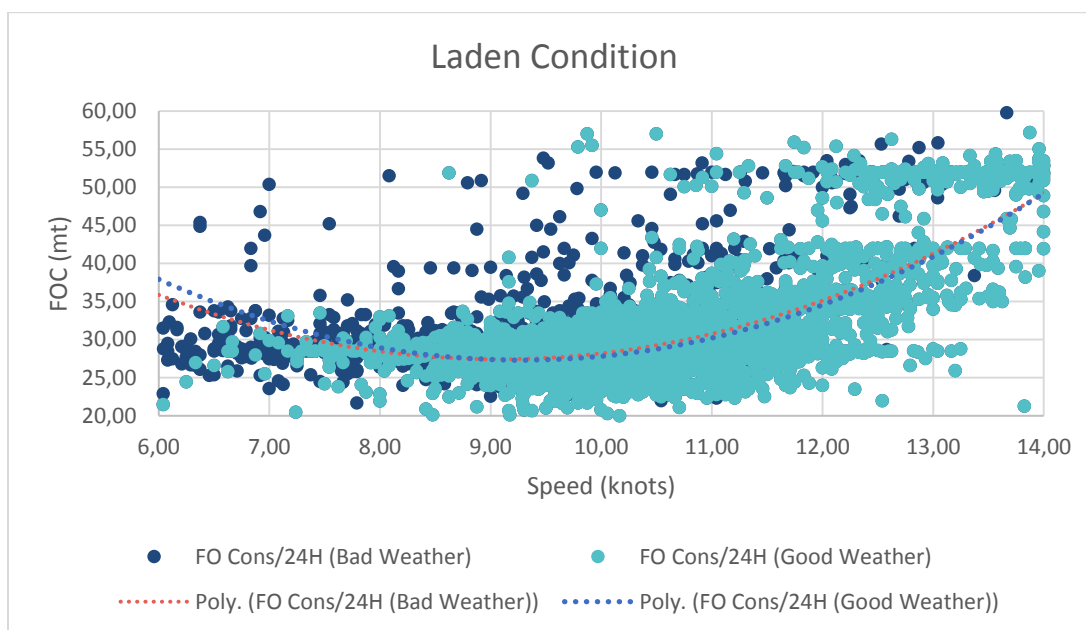
## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

Από την ανωτέρω σύγκριση μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα εν λόγω πλοία έχουν παρόμοια συμπεριφορά σε παρόμοιες καιρικές συνθήκες, κατά συνέπεια, μπορεί να γίνει περαιτέρω μελέτη της απόδοσης ως στόλου, και όχι για κάθε επιμέρους πλοίο ξεχωριστά.

Από το σύνολο, λοιπόν, των ταξιδιών όλων των πλοίων του στόλου, και έχοντας κάνει διαλογή των δεδομένων σύμφωνα με την παράγραφο 4.4, γίνεται ανάλυση της επίδρασης του ανέμου και προκύπτουν τα ακόλουθα γραφήματα ταχύτητας – ημερήσιας κατανάλωσης, σε κατάσταση ερματισμού και στη συνέχεια σε έμφορτη κατάσταση.



Εικόνα 4.3: Επίδραση του παράγοντα "Ένταση ανέμου" σε κατάσταση ερματισμού

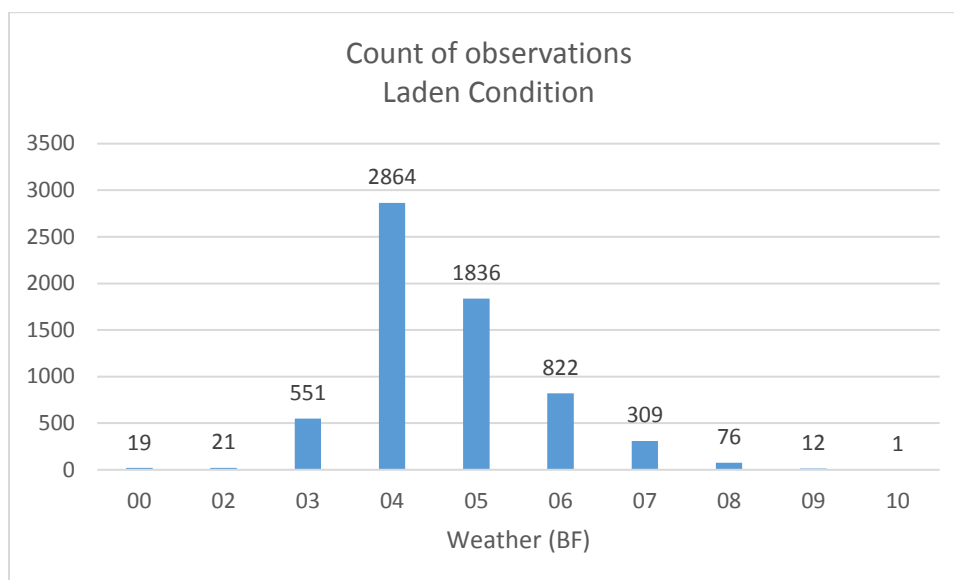


Εικόνα 4.4: Επίδραση του παράγοντα "Ένταση ανέμου" σε έμφορτη κατάσταση

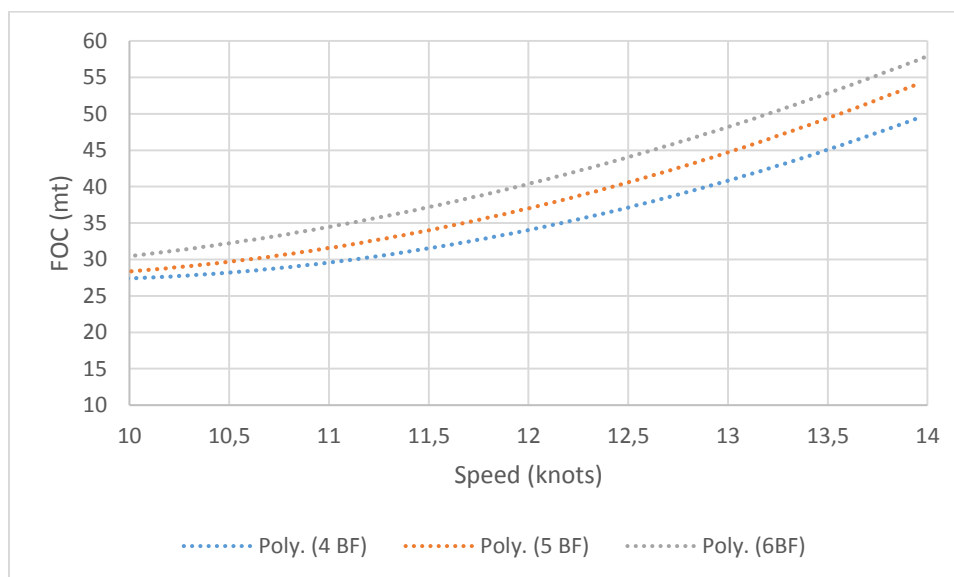
Από τα ανωτέρω γραφήματα προκύπτει ότι η επίδραση της έντασης του ανέμου είναι εμφανής στην περίπτωση της κατάστασης ερματισμού, ωστόσο στην έμφορτη κατάσταση οι προσεγγιστικές καμπύλες για τις περιπτώσεις καλού και κακού καιρού, σχεδόν ταυτίζονται μεταξύ τους.

Προχωρώντας, λοιπόν, σε περαιτέρω διερεύνηση της συμπεριφοράς των πλοίων σε έμφορτη κατάσταση για συγκεκριμένες τιμές έντασης του ανέμου (αυτές οι οποίες είναι οι συχνότερα εμφανιζόμενες, ήτοι 4, 5 και 6 BF), προκύπτουν τα ακόλουθα γραφήματα:

## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις



Εικόνα 4.5: Πλήθος παρατηρήσεων για διάφορες τιμές έντασης ανέμου σε έμφορτη κατάσταση

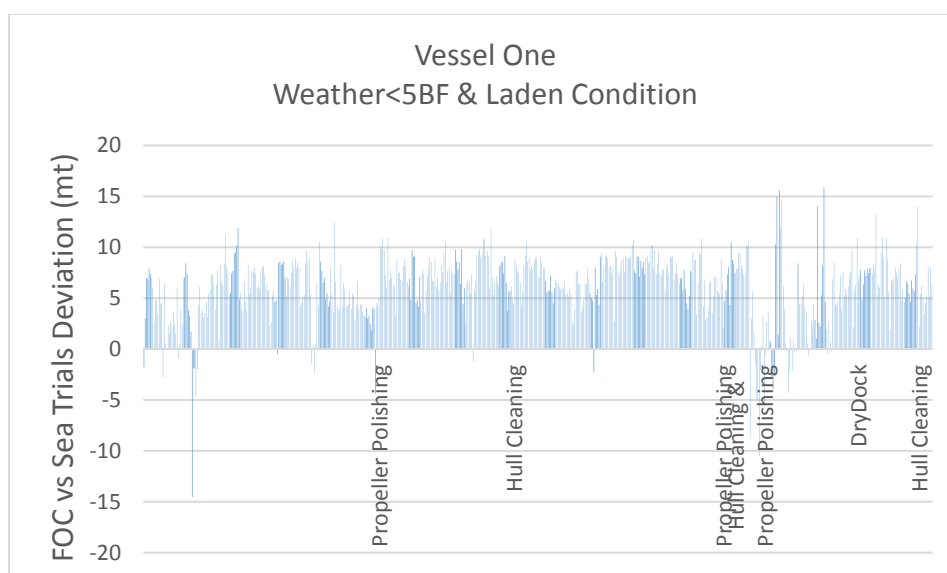


Εικόνα 4.6: Προσεγγιστικές καμπύλες σε έμφορτη κατάσταση για συγκεκριμένες τιμές έντασης ανέμου

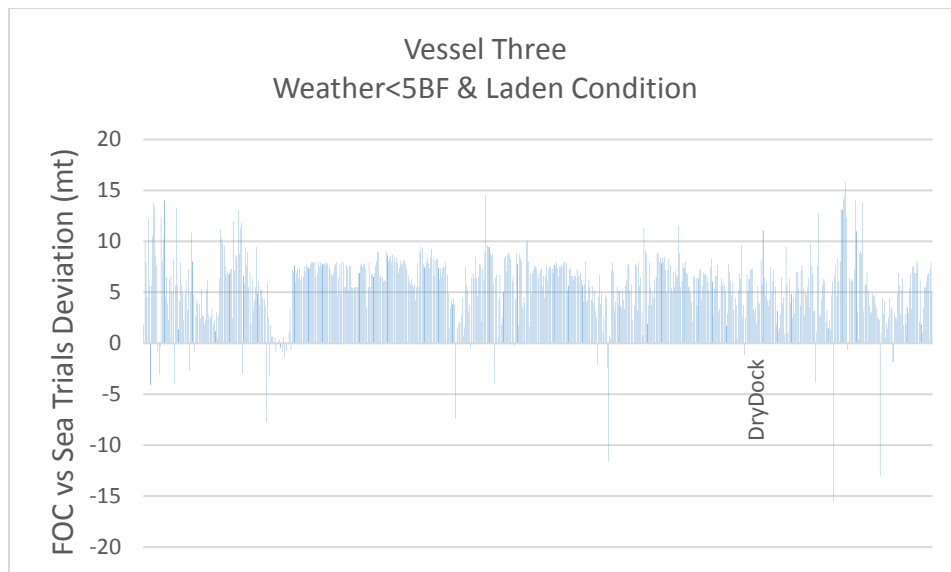
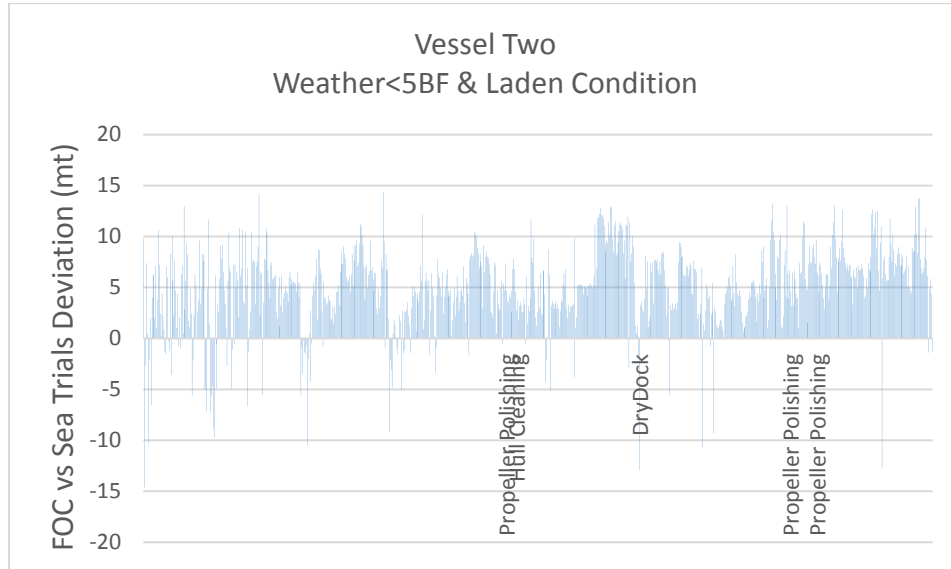
Πράγματι, λοιπόν, όπως αναμενόταν, όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση του ανέμου τόσο αυξάνει η κατανάλωση. Ωστόσο, αυτό το συμπέρασμα δεν φάνηκε εξαρχής από την ανάλυση των δεδομένων, για λόγους που παρουσιάζονται στα επόμενα.

## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

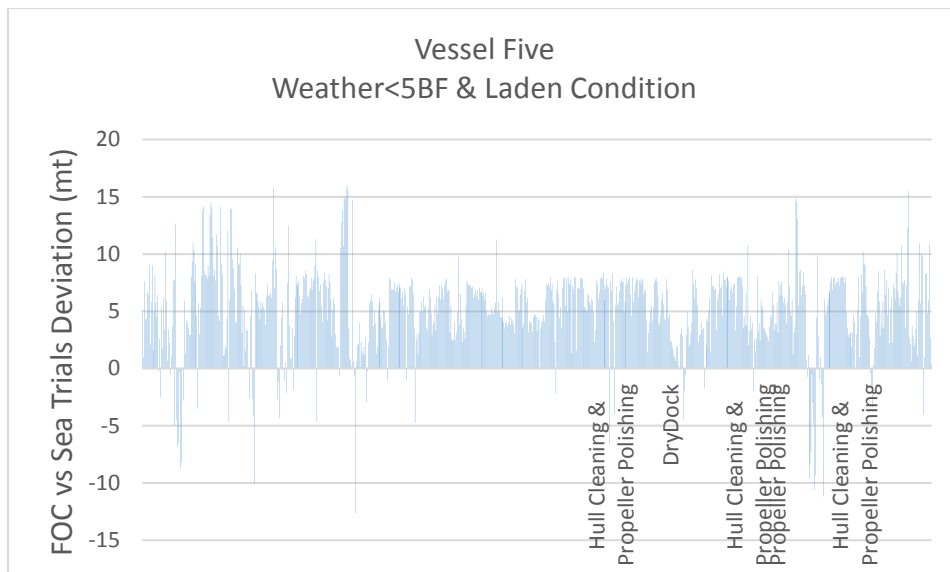
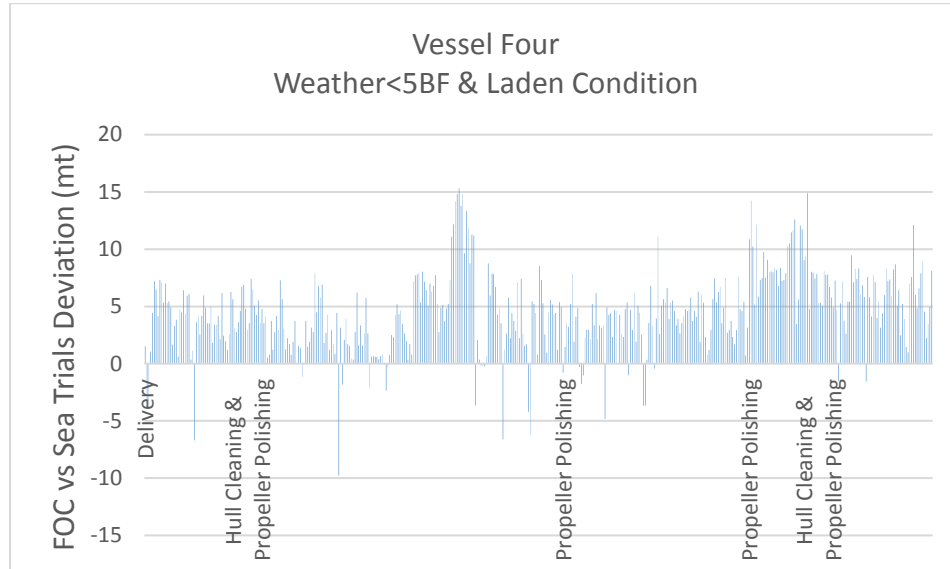
Στη συνέχεια εξετάστηκε η επίδραση του παράγοντα «Κατάσταση κύτους» στη συνολική κατανάλωση καυσίμου. Για τον σκοπό αυτό, έγινε εξαίρεση των δεδομένων που αντιστοιχούν σε ένταση ανέμου μεγαλύτερη από 5 BF, ώστε να απαλειφθεί η επίδραση αυτού του παράγοντα από τη συγκεκριμένη φάση της ανάλυσης. Στα ακόλουθα γραφήματα απεικονίζεται η απόκλιση της πραγματικής κατανάλωσης πετρελαίου σε σχέση με την αναμενόμενη τιμή που προκύπτει από τις δοκιμές παραλαβής (sea trials), για καθένα από τα 8 αδελφά πλοία για όλο το χρονικό διάστημα των ταξιδιών που έχουν κάνει μέχρι τον Ιανουάριο του 2018, σε κατάσταση φόρτωσης και έχοντας εξαιρέσει τις ημέρες όπου η ένταση του ανέμου ήταν μεγαλύτερη από 5 BF. Επιπλέον, έχουν επισημανθεί στον οριζόντιο άξονα βελτιωτικές δράσεις σχετικά με την κατάσταση του κύτους (δεξαμενισμός, καθαρισμός κύτους και έλικας).



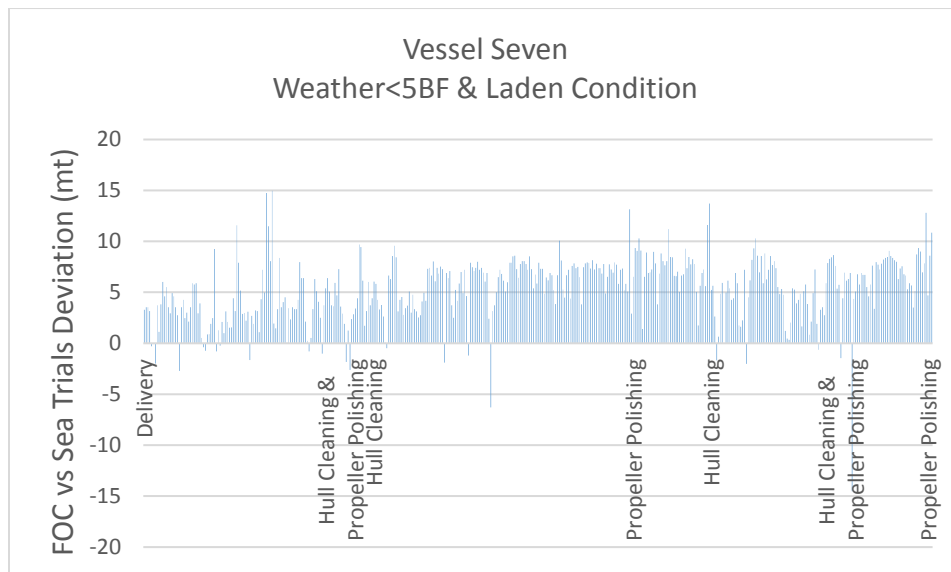
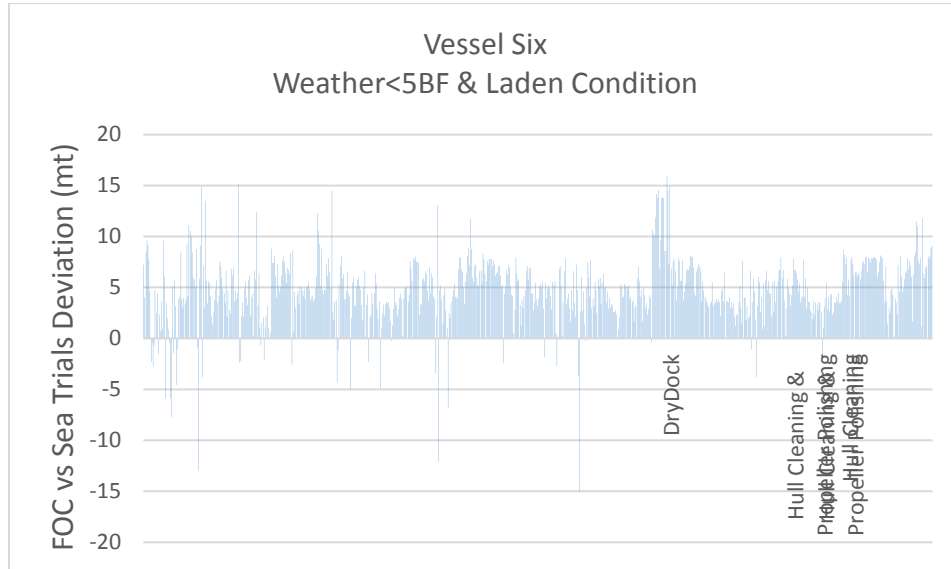
## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις



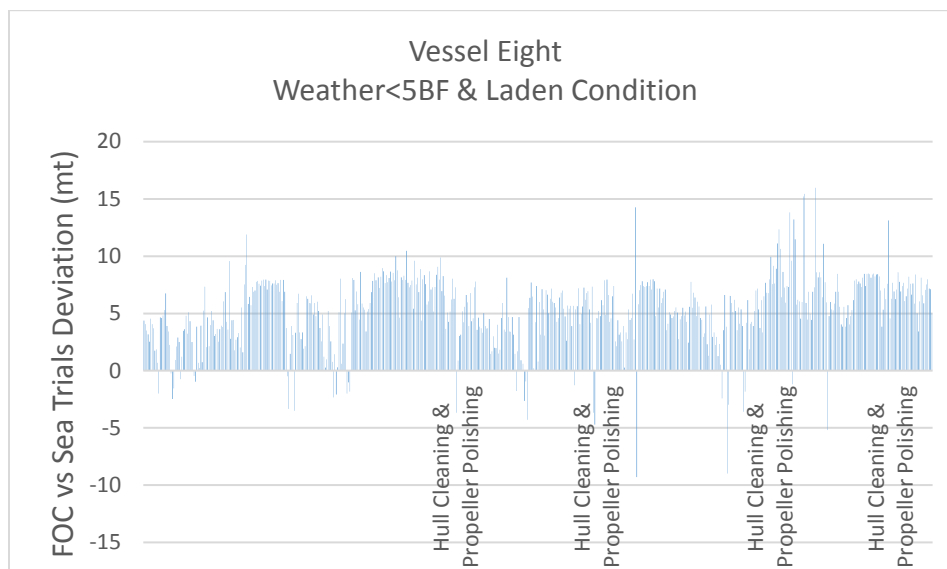
## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις



## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις







Από τα παραπάνω γραφήματα, παρότι στις περισσότερες περιπτώσεις φαίνεται μείωση της κατανάλωσης μετά την εφαρμογή κάποιας δράσης βελτίωσης της κατάστασης του κύτους (δεξαμενισμοί, καθαρισμοί κύτους ή/και έλικας) παρατηρούμε ότι δεν είναι δυνατή η εξαγωγή ενός ασφαλούς συμπεράσματος σχετικά με την επίδραση που έχει αυτή η παράμετρος. Παρότι η παράμετρος της έντασης του ανέμου έχει φιλτραριστεί προκειμένου να παρουσιάζονται μόνο τα δεδομένα όπου δεν επικρατούσαν άνεμοι έντασης μεγαλύτερης από 5 BF, προφανώς υπάρχουν και άλλες παράμετροι, οι οποίες δεν περιλαμβάνονται στα διαθέσιμα δεδομένα για τη μελέτη της παρούσας εργασίας, και επηρεάζουν την κατανάλωση της κύριας μηχανής.

#### 4.7 Παραδοχές

Από την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, συνολικά, τα μεγαλύτερα προβλήματα που παρατηρήθηκαν στη συλλογή των δεδομένων είναι τα εξής:

- Ασυνέχεια στις καταγραφές, λόγω στιγμιαίων μετρήσεων σε ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται κάθε στιγμή το πλοίο
- Αναξιόπιστες καταγραφές, λόγω περιθωρίων σφάλματος στον μετρητικό εξοπλισμό
- Λανθασμένες εγγραφές, λόγω ανθρώπινου λάθους

Επίσης, οι ακόλουθοι παράγοντες, αν και επηρεάζουν την απόδοση του πλοίου, δεν έχουν ληφθεί υπόψη διότι δεν ήταν διαθέσιμα τα αντίστοιχα δεδομένα για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

**Επίπεδο φόρτωσης:** Ο συνυπολογισμός του βυθίσματος θα ήταν αρκετά χρονοβόρα διαδικασία στην προκειμένη περίπτωση, διότι τα δεδομένα της κατάστασης φόρτωσης σε κάθε ταξίδι δεν περιλαμβάνονται στην ίδια ηλεκτρονική πλατφόρμα επικοινωνίας από την οποία αντλήθηκαν οι μεσημβρινές αναφορές ημερολογίου (noon reports).

**Βάθος νερού:** Ο υπολογισμός του βάθους του νερού κατέστη ανέφικτος εξαιτίας της έλλειψης δεδομένων για το βάθος του νερού στους ωκεανούς μέσω του Διαδικτύου. Παρόλα αυτά, η επίδραση του βάθους του νερού στη δυναμική ροή γύρω από το κύτος θεωρείται ότι δεν επηρεάζει ιδιαίτερα, καθώς οι μετρήσεις μας αφορούν πλεύση σε ανοικτή θάλασσα, όπου σε βάθος νερού μεγαλύτερο από 100 μ. η ταχύτητα μειώνεται λιγότερο από 1%.

**Χαρακτηριστικά κύματος:** Τα στοιχεία που ήταν διαθέσιμα για τον άνεμο ήταν μόνο η ένταση και η κατεύθυνσή του. Συνεπώς, οι εκτιμήσεις για την κατάσταση της θάλασσας μπορούσαν να είναι μόνο ποιοτικές και, κατά συνέπεια, έχουν μεγάλο εύρος αβεβαιότητας ως προς τα χαρακτηριστικά (ύψος και περίοδος/μήκος) των επικρατούντων κυματισμών, που είναι γενικά ανεμογενείς, ακανόνιστοι κυματισμοί.

**Χαρακτηριστικά θαλασσινού νερού:** Θερμοκρασία, πυκνότητα, συνεκτικότητα, αλατότητα, δείκτης pH, η αξιολόγηση των οποίων θα μπορούσε να δώσει πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες ανάπτυξης μικροοργανισμών στο κύτος και την έλικα του πλοίου, και κατά συνέπεια, να αποτελεί ένδειξη της ρύπανσης του πλοίου.

**Κατανάλωση βοηθητικών μηχανημάτων:** Στην παρούσα μελέτη δεν λήφθηκε υπόψη η κατανάλωση που προέρχεται από τις βοηθητικές ηλεκτρομηχανές και τα boilers, παρά μόνο η κατανάλωση της κύριας μηχανής του πλοίου, δεδομένου ότι αυτή είναι η κυρίαρχη κατανάλωση ενέργειας κατά την πλεύση σε ανοιχτή θάλασσα.

## 5 Συμπεράσματα

Η συνεχής παρακολούθηση της απόδοσης του πλοίου μπορεί να αποτελέσει εξαιρετικό εργαλείο τόσο στο πλήρωμα του πλοίου όσο και στον πλοιοκτήτη. Η βασική ιδέα και προϋπόθεση για ένα τέτοιο σύστημα είναι η καταμέτρηση σημαντικών παραμέτρων επάνω στο πλοίο, η συστηματική ανάλυσή τους και η παρουσίαση των συμπερασμάτων με έναν κατανοητό και σαφή τρόπο τόσο στο πλήρωμα του πλοίου όσο και στον πλοιοκτήτη. Με βάση αυτήν τη συνεχή παρακολούθηση, μπορούν αρχικά να σχεδιαστούν και κατόπιν να υλοποιηθούν οι απαραίτητες διορθωτικές ενέργειες.

Ένα παράδειγμα θα μπορούσε να είναι η επισήμανση αυξημένης κατανάλωσης καυσίμου στην κύρια μηχανή. Ο πρώτος μηχανικός οφείλει να ερμηνεύσει και να αξιολογήσει αυτήν τη ροή του καυσίμου και να διαπιστώσει εάν η μέτρηση είναι ορθή. Η πρωτογενής αιτία αυξημένης κατανάλωσης καυσίμου θα μπορούσε φυσικά να είναι η μειωμένη απόδοση του πλοίου. Ωστόσο, ένα σφάλμα του αισθητήρα, λανθασμένες ή ελλιπείς καταγραφές αποτελούν στοιχεία κρίσιμης σημασίας για την αξιοπιστία ενός συστήματος παρακολούθησης της απόδοσης του πλοίου [5]. Παρακάτω αναλύονται τα οφέλη αλλά και οι δυσκολίες που καλείται κανείς να αντιμετωπίσει κατά τη διαδικασία ανάλυσης της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου.

### 5.1 Κίνητρα και προκλήσεις

Τα οφέλη που απορρέουν από την παρακολούθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας του πλοίου, εκτός από την προφανή εξοικονόμηση του κόστους λειτουργίας του, συνοψίζονται κατωτέρω.

#### Περιβαλλοντικά οφέλη

Η παγκόσμια πρόκληση της αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής, το αυξημένο κόστος λειτουργίας του πλοίου και οι νέοι κανονισμοί που τίθενται σε εφαρμογή σε διεθνές επίπεδο και αφορούν τον τομέα της Ναυτιλίας είναι οι πρωταρχικοί παράγοντες που καθιστούν απαραίτητη την παρακολούθηση της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου. Όσο πιο περίπλοκο γίνεται το νομικό πλαίσιο που διέπει τον τομέα της Ναυτιλίας και οι απαιτήσεις των ναυλωτών γίνονται όλο και υψηλότερες, τόσο περισσότερο θα αυξάνει και ο όγκος των δεδομένων μεγάλης κλίμακας που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και να

## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

αναλύονται προσεκτικά προκειμένου να εξάγονται ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με την απόδοση του πλοίου.

### **Εκτίμηση της κατάστασης του κύτους**

Η συλλογή, επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων που σχετίζονται με την κατανάλωση του καυσίμου κατά τη διάρκεια λειτουργίας του πλοίου μπορεί να αξιοποιηθεί προκειμένου να λαμβάνονται σωστές αποφάσεις σχετικά με τις ανάγκες καθαρισμού του κύτους, την ποιότητα των αντιρρυπαντικών συστημάτων ή το διάστημα μεταξύ δύο δεξαμενισμών.

### **Εκτίμηση της κατάστασης της μηχανής**

Ο συνεχής έλεγχος της κατανάλωσης του καυσίμου μπορεί να αναδείξει προβλήματα που σχετίζονται με μειωμένη απόδοση της κύριας μηχανής ούτως ώστε να γίνουν οι κατάλληλες εργασίες διόρθωσης των ρυθμίσεων και συντήρησης. Επίσης, επιτρέπει τον κατάλληλο χρονικό προγραμματισμό των τεχνικών εργασιών στην κύρια μηχανή και τα βοηθητικά συστήματα, όπως για παράδειγμα οι αλλαγές βαλβίδων, εμβόλων, φίλτρων αέρα κ.ά.

### **Αυξημένη ανταγωνιστικότητα**

Οι εγγυήσεις σχετικά με την κατανάλωση καυσίμου και τα επίπεδα ταχύτητας που δίδονται βάσει ναυλοσυμφώνων πολλές φορές είναι ανακριβείς, μιας και δεν είναι γνωστό εάν η μειωμένη απόδοση ενός πλοίου οφείλεται σε δύσκολες καιρικές συνθήκες ή σε κακή συντήρηση του πλοίου. Αντίθετα, όταν η απόδοση του πλοίου είναι γνωστή, ελεγχόμενη καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του και σαφώς προσδιορισμένη ανεξάρτητα από εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες ή καταστάσεις φόρτωσης, τότε ο πλοιοκτήτης αποκτά ανταγωνιστικό πλεονέκτημα κατά τη σύναψη ναυλοσυμφώνων.

### **Βελτιστοποίηση της απόδοσης**

Εάν όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση του πλοίου καταγράφονται και ελέγχονται σε τακτική βάση, τότε είναι δυνατή η δημιουργία μίας μεγάλης βάσης δεδομένων που μπορεί να αξιοποιηθεί για την ορθή ρύθμιση πολλών παραμέτρων καθ'

## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

όλη τη διάρκεια ζωής του πλοίου. Επιπλέον, με τη βέλτιστη συχνότητα και ποιότητα συντήρησης, η φθορά των ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων και του κύτους θα είναι βραδύτερη. Τέλος, η διαθεσιμότητα αξιόπιστων πληροφοριών σχετικά με την απόδοση του πλοίου επιτρέπει στο πλήρωμα να έχει καλύτερη κατανόηση και άμεση αντίληψη των συνεπειών που έχουν οι ενέργειές τους στην απόδοση του πλοίου. Μπορεί να αξιοποιηθεί επιπλέον προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη διαδρομή πλοήγησης και οι κατάλληλες συνθήκες φόρτωσης.

Ωστόσο, ο έλεγχος και η συνεχής παρακολούθηση της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου δεν είναι μία εύκολη υπόθεση. Παρακάτω αναλύονται τα προβλήματα που απορρέουν κατά τη μελέτη της ενεργειακής απόδοσης ενός πλοίου μέσω των μεσημβρινών αναφοράς ημερολογίου (noon reports):

### **Αξιοπιστία δεδομένων**

Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που συναντάται κατά την ανάλυση δεδομένων μεγάλης κλίμακας που αφορούν την απόδοση του πλοίου είναι η αξιοπιστία και η συνοχή των δεδομένων αυτών. Για να βελτιωθεί η αξιοπιστία των δεδομένων που προέρχονται από τις μεσημβρινές αναφορές παράδοσης (noon reports), κρίνεται αναγκαίο το φιλτράρισμά τους. Η αυτοματοποιημένη εξαγωγή και αποθήκευση των σχετιζόμενων παραμέτρων αποτελεί μονόδρομο για να μπορέσει να ξεπεραστεί αυτή η δυσκολία.

### **Μετεωρολογικά δεδομένα**

Επίσης, μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας έχουν οι τιμές σχετικά με τα δεδομένα καιρού που καταγράφηκαν, αφού αυτές αφορούσαν την κατάσταση του ανέμου και των θαλάσσιων ρευμάτων τη στιγμή της μέτρησης, με αποτέλεσμα, σε περίπτωση έντονων διακυμάνσεων στις τιμές, να μην μπορούν να εκτιμηθούν σωστά. Σημαντικός παράγοντας σε αυτήν την παράμετρο είναι, γενικά, η ανεπαρκής εκπαίδευση του πληρώματος σχετικά με την απόδοση του πλοίου, π.χ. παρατηρήσεις του κυματισμού.

Τις προκλήσεις που προαναφέρθηκαν ανωτέρω καλείται να αντιμετωπίσει ο επιστημονικός τομέας της **μηχανικής μάθησης**, ο οποίος περιλαμβάνει ένα εύρος αλγορίθμων οι οποίοι μπορούν να εκπαιδευτούν αξιοποιώντας μεγάλα πλήθη δεδομένων (big data) προκειμένου να επιλύουν προβλήματα πρόβλεψης, ταξινόμησης και απόφασης.

## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

Η μεγάλη τους διαφορά σε σχέση με τις κλασικές προσεγγίσεις έγκειται στο γεγονός ότι οι κανόνες λειτουργίας τους δεν καθορίζονται εξ αρχής βάσει προγραμματιστικών κανόνων ή μαθηματικών μοντέλων, αλλά προκύπτουν μέσα από τα ίδια τα δεδομένα. Ένα από τα σπουδαιότερα πλεονεκτήματα των εφαρμογών μηχανικής μάθησης είναι ότι πολλές φορές ενδέχεται να ανακαλύψουν νέους, άγνωστους σε εμάς κανόνες για να επιλύσουν ένα πρόβλημα καθώς και τις σχέσεις που πιθανώς υπάρχουν μεταξύ των δεδομένων και τις αξιοποιούν προκειμένου να βρεθεί η επίλυση ενός προβλήματος, η οποία δεν μπορούσε να βρεθεί μέσα από μια θεωρητική προσέγγιση. [36] Επίσης, καθώς ο αλγόριθμος δέχεται νέα δεδομένα, μπορεί να εκπαιδευτεί εκ νέου και να μάθει από τα λάθη του, βελτιώνοντας σταδιακά την απόδοσή του. Ο επόμενος πίνακας παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των κλασικών προσεγγίσεων συγκριτικά με τις μεθόδους μηχανικής μάθησης.

*Πίνακας 6: Σύγκριση μεθοδολογιών ανάλυσης της απόδοσης του πλοίου που βασίζονται σε Noon Reports και Live Data*

	<b>Noon Reports</b>	<b>Live Data</b>
<b>Πλεονεκτήματα</b>	<p>Χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης εξοπλισμού</p> <p>Δυνατότητα εφαρμογής σε μικρότερα σύνολα δεδομένων</p> <p>Δεν απαιτείται μεγάλος χρόνος για τη συλλογή και την ανάλυση των δεδομένων</p> <p>Το αποτέλεσμα της ανάλυσης είναι εύκολα αντιληπτό</p>	<p>Υψηλή συχνότητα μετρήσεων (μεγάλη ακρίβεια)</p> <p>Σχεδόν μηδενική ανθρώπινη παρέμβαση</p> <p>Συνέχεια μετρήσεων και καταγραφών</p> <p>Δεν απαιτείται προηγούμενη γνώση για την εφαρμογή των αλγορίθμων</p>

Μειονεκτήματα	<p>Χαμηλή συχνότητα μετρήσεων (μέσος όρος 24ώρου)</p> <p>Μεγάλη πιθανότητα λάθους λόγω ανθρώπινου παράγοντα (κατά την ανάγνωση, μέτρηση, καταγραφή)</p> <p>Ασυνέχεια καταγραφών</p>	<p>Υψηλές απαιτήσεις συντήρησης εξοπλισμού</p> <p>Απαιτείται μεγάλο πλήθος ετερογενών δεδομένων για να εκπαιδευτούν επαρκώς</p> <p>Προβάλλεται μόνο η λύση του προβλήματος και όχι η λογική της, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να αιτιολογηθεί επαρκώς</p>
---------------	---	--

Εν κατακλείδι, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία καταδεικνύουν τη σπουδαιότητα του ελέγχου και της παρακολούθησης της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου. Ιδιαίτερα στον τομέα της ποντοπόρου ναυτιλίας, μόνο η κατανάλωση του καυσίμου συμμετέχει, ανάλογα με τον τύπο και τη λειτουργία του πλοίου, σχεδόν κατά 60% στο συνολικό κόστος λειτουργίας του, με το υπόλοιπο περίπου 40% των λειτουργικών εξόδων να αφορούν συνολικά το πλήρωμα, τα λιμενικά έξοδα, τη συντήρηση και την επισκευή του πλοίου. Γίνεται λοιπόν φανερό ότι τα μεγέθη τόσο σχετικά με την ποσότητα του καυσίμου που καταναλώνεται όσο και με το ύψος της οικονομικής δαπάνης που αυτή συνεπάγεται είναι τεράστιας σημασίας, και κατά συνέπεια η διαρκής παρακολούθηση και ανάλυση δεδομένων μεγάλης κλίμακας θα προσφέρει σημαντικότερη εξοικονόμηση τόσο στους διαθέσιμους ενεργειακούς πόρους όσο και στις οικονομικές δαπάνες, σε παγκόσμιο επίπεδο.

## 5.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Στο τελευταίο αυτό κεφάλαιο της εργασίας προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα, με αφετηρία την παρούσα μελέτη. Η συγκεκριμένη εργασία προσέγγισε το θέμα της ενεργειακής απόδοσης ενός πλοίου τόσο από θεωρητική όσο και από πρακτική σκοπιά, ούτως ώστε να παρουσιαστεί η ρεαλιστική εικόνα του προβλήματος της εξοικονόμησης καυσίμου στα πλοία. Έτσι, μέσα από τη σύνθεση της θεωρητικής μελέτης και της πρακτικής εφαρμογής μεθόδων στατιστικής ανάλυσης σε πραγματικά δεδομένα

## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

επιβεβαιώνονται οι αλληλεξαρτήσεις αλλά και αναδεικνύονται τα προβλήματα που καλείται κανείς να αντιμετωπίσει, θέτοντας έτσι τις προδιαγραφές για περαιτέρω ανάλυση των παραγόντων που επιδρούν στην κατανάλωση του καυσίμου ενός πλοίου.

Η σπουδαιότερη επέκταση της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο προσδιορισμός του **περιβαλλοντικού οφέλους** που προκύπτει από την εξοικονόμηση καυσίμου αλλά και το **περιβαλλοντικό κόστος** στην περίπτωση της μη-δράσης. Η διάσταση του περιβαλλοντικού οφέλους εκτείνεται σε παγκόσμιο επίπεδο, μιας και το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η επάρκεια των συμβατικών ενεργειακών πόρων και η κλιματική αλλαγή είναι ζητήματα που αφορούν ολόκληρο τον πλανήτη. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχει σαφώς μία συσχέτιση ανάμεσα στην ενέργεια και τις εκπομπές CO<sub>2</sub>, ωστόσο δεν θα πρέπει να εξισώνονται σε καμία περίπτωση αυτές οι δύο έννοιες. Για παράδειγμα, η πρόωση ενός πλοίου μέσω ηλεκτρικών κινητήρων που τροφοδοτούνται από μπαταρίες, ώστε το πλοίο να λειτουργεί με «καθαρή» ηλεκτρική ενέργεια και μηδενικές εκπομπές CO<sub>2</sub>, θα είχε ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό του Δείκτη Ενεργειακής Αποδοτικότητας Λειτουργίας (Energy Efficiency Operational Indicator – EEOI) και του Δείκτη Ενεργειακής Αποδοτικότητας Σχεδιασμού (Energy Efficiency Design Index – EEDI) ίσους με μηδέν. Αυτό βέβαια δεν σημαίνει ότι το πλοίο δεν καταναλώνει ενέργεια. Στην πραγματικότητα, τα αμιγώς «εξηλεκτρισμένα» πλοία έχουν μεγαλύτερο βάρος από τα πετρελαιοκίνητα, καθώς οι απαιτήσεις σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές προσθέτουν ένα μεγάλο ποσοστό στο συνολικό βάρος του πλοίου, καταναλώνοντας έτσι τελικά περισσότερη ενέργεια.

Επιπλέον, σε μελλοντική εργασία, θα μπορούσαν να εφαρμοστούν αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης για αξιοποιώντας **δεδομένα πραγματικού χρόνου** (live data) που προέρχονται από αυτοματοποιημένα συστήματα παρακολούθησης, με **μεγαλύτερο βάθος χρόνου** και για **μεγαλύτερο αριθμό πλοίων**. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των μεθόδων μηχανικής μάθησης είναι ότι η ύπαρξη πολλών και καλών δεδομένων είναι συχνά σημαντικότερη από την ύπαρξη καλών αλγορίθμων. Από την άλλη πλευρά, όπως προαναφέρθηκε, χρειάζονται πολλά και ετερογενή δεδομένα για να εκπαιδευτούν επαρκώς.

Προς αυτήν την κατεύθυνση, λοιπόν, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία θα μπορούσε να επεκταθεί συγκριτικά σε περιπτώσεις τοποθέτησης **συστημάτων εξοικονόμησης ενέργειας** (π.χ. Mewis duct), προκειμένου να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητά τους, συγκρίνοντας την απόδοση του πλοίου **πριν και μετά** την εφαρμογή τους.

Μία ακόμη προοπτική που διαφαίνεται από την παρούσα εργασία είναι η μελέτη της συσχέτισης που έχει η **σχεδίαση** ενός πλοίου με την κατανάλωση καυσίμου. Η ενεργειακή απόδοση ενός πλοίου εξαρτάται γενικά τόσο από τη σχεδίαση όσο και από τη διαχείρισή



## Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου: Κίνητρα και Προκλήσεις

του. Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την κατανάλωση του καυσίμου ενός πλοίου, κατά τη *λειτουργία* του, και όχι τη *σχεδίασή* του.

Τέλος, μία άλλη επέκταση αυτής της εργασίας θα μπορούσε να είναι η έρευνα της αλληλεξάρτησης **επιπλέον παραγόντων** στην κατανάλωση του καυσίμου. Σε αντίθεση με πολλούς άλλους ελέγχους της επίδοσης του πλοίου, οι οποίοι αφορούν την κατανάλωση καυσίμου, η κατανάλωση **λιπαντικών** φαίνεται απευθείας στον λογαριασμό των πλοιοκτητών και οι πλοιοκτήτες θα επωφεληθούν απευθείας από την εξοικονόμηση. Τα οφέλη είναι η άμεση μείωση των λιπαντικών αλλά και οι μικρότερες ανάγκες συντήρησης του κινητήρα. Άλλοι παράγοντες που θα μπορούσαν να διερευνηθούν, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχουν διαθέσιμα τα αντίστοιχα δεδομένα, είναι για παράδειγμα, η **θερμοκρασία** του θαλασσινού νερού, η **αλατότητα**, το είδος και η κατηγορία **αντιρρυπαντικών συστημάτων** και των **υφαλοχρωμάτων**, το ύψος του **κυματισμού**, η ποιότητα των καθαρισμών του κύτους κ.ά. είναι όλα άρρηκτα συνδεδεμένα με την αντίσταση του πλοίου και κατ' επέκταση με την τελική κατανάλωση καυσίμου. Κατά συνέπεια, η περαιτέρω μελέτη αυτών των παραγόντων θα μπορούσε να αποδώσει χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου, με όλα τα συνεπαγόμενα οικονομικά, λειτουργικά και περιβαλλοντικά οφέλη.



## 6 Βιβλιογραφία

- [1] I. P. ο. C. C. (IPCC), «Assessment Report (AR5),» 2014. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ipcc.ch/>.
- [2] T. W. F. Hasselaar, An investigation into the development of an advanced ship performance monitoring and analysis system, Newcastle upon Tyne, UK: Newcastle University, 2010.
- [3] S. F. Soren Hansen, *An Integrated Vessel Performance System for Environmental Compliance*, Springer International Publishing, 2018.
- [4] P. a. Larsen, Prediction of Full-Scale Propulsion Power using Artificial Neural Networks, 2009.
- [5] B. L. C. G. Eric Hagestuen, *Continuous Performance Monitoring - A Practical Approach to the ISO 19030 Standard*.
- [6] Study on the optimization of energy consumption as part of implementation of a Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP), London: IMO, 2016.
- [7] Γ. Κ. Πολίτης, Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, 2016.
- [8] J. J. M.J. και J. Pinkster, Introduction to ship hydrodynamics, Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2002.
- [9] Anti-fouling systems, IMO, 2002.
- [10] S. V. Hansen, Performance Monitoring of Ships, Technical University of Denmark, 2011.

- [11] K. Lauri, Study of Hull Fouling on cruise vessels across various seas, Helsinki, Finland: ENIRAM, 2012.
- [12] Water Dissolves, Massachussets, USA: Global Lab Studies, 2010.
- [13] Z. J. C. A. Whitmarsg F., Ocean heat uptake and the global surface temperature record, London: Imperial College, 2015.
- [14] A. B. ., H. B. ., M. T. P. Andersen, 2005.
- [15] V. Bertram, Practical Ship Hydrodynamics, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [16] W. Y. W. W. T. S. K. C. W. Y. Feiyang Zhao, «An Overall Ship Propulsion Model for Fuel Efficiency Study,» σε *The 7th International Conference on Applied Energy - ICAE2015*, 2015.
- [17] D. K. Nicolas Bialystocki, On the estimation of ship's fuel consumption and speed curve: A statistical approach, Shanghai: Elsevier B. V., 2016.
- [18] B. M. L. A. K. P. C. J. J. O. S. Lokukaluge P. Perera, «Evaluations on ship performance under varying operational conditions,» σε *ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, 2015.
- [19] L. O. F. B. D. A. Andrea Coraddu, *Vessels fuel consumption forecast and trim optimisation: A data analytics perspective*, ScienceDirect, 2016.
- [20] B. M. Lokukaluge P. Perera, *Machine Intelligence based Data Handling Framework for Ship Energy Efficiency*, 2016.
- [21] B. M. Lokukaluge P. Perera, *Marine Engine-Centered Data Analytics for Ship Performance Monitoring*, 2017.

- [22] «Laros,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.laros.gr/index.php/laros>.
- [23] P. Dynamics. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.propulsiondynamics.com/>.
- [24] «DNV GL,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.dnvgl.com/>.
- [25] «BMT SMART,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.bmtsmart.com/>.
- [26] «KYMA,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.kyma.no/>.
- [27] «Propulsion Analytics,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://propulsionanalytics.com/>.
- [28] IMO, Third IMO GHG Study, London: International Maritime Organization, 2014.
- [29] «Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Great\\_circle](https://en.wikipedia.org/wiki/Great_circle). [Πρόσβαση 2019].
- [30] Wärtsilä, «Wärtsilä EnergoFlow,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.wartsila.com/>. [Πρόσβαση 2019].
- [31] T. S. (. Lefteris Karaminas, Ship powering performance - Learning from the challenges faced by Owners, London, UK: The Royal Institution of Naval Architects, 2016.
- [32] B. Schmarzo, 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://infocus.dellemc.com/william\\_schmarzo/the-big-data-storymap/](https://infocus.dellemc.com/william_schmarzo/the-big-data-storymap/).
- [33] C. G. Bjarte Lund, «The Big Data Concept in a performance monitoring perspective,» 2017.

- [34] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ibmbigdatahub.com/infographic/four-vs-big-data>.
- [35] ISO 15016/2015, “Ships and marine technology – Guidelines for the assessment of speed and power performance by analysis of speed trial data”.
- [36] Ε. Σ. Α. κ. Διοίκησης, Διαλέξεις Μαθήματος "Industry 4.0 & Έξυπνες Πόλεις", Αθήνα: Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, 2018.
- [37] S. Harvald, Resistance and Propulsion of Ships, New York: John Wiley & Sons, 1983.
- [38] B. M. Lokukaluge P. Perera, Ship speed power performance under relative wind profiles, Trondheim, Norway: Norwegian Marine Technology Research Institute (MARINTEK), 2016.
- [39] «Energy matters to climate change,» 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.emc2.gr/>.