



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

**Κατασκευή υπολογιστικού εργαλείου για τον αναλυτικό  
υπολογισμό των αερίων εκπομπών από τη λειτουργία των  
πλοίων**

Διπλωματική εργασία

Ιωάννης Καλογερόπουλος

Επιβλέπων:

Δρ. Νικόλαος Π. Βεντικός  
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2020

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Νικόλαο Βεντίκο, Αναπληρωτή Καθηγητή στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος και τις πολύτιμες συμβουλές του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κύριο Κωνσταντίνο Λούζη, Υποψήφιο Διδάκτορα στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, για την καθοδήγηση και την ουσιαστική βοήθεια που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

# Περιεχόμενα

Περίληψη .....	5
Abstract .....	7
<b>1. Εισαγωγή.....</b>	<b>9</b>
1.1 Αέριες εκπομπές και ναυτιλία.....	9
1.1.2 Αέρια του θερμοκηπίου .....	9
1.1.3 Ατμοσφαιρικοί ρύποι .....	10
<b>2. Ισχύουσες απαιτήσεις και κανονισμοί .....</b>	<b>11</b>
2.1 Η συμφωνία του Κιότο .....	11
2.2 Διεθνής Σύμβαση για την Αποφυγή της Ρύπανσης από τα Πλοία, MARPOL 73/78.....	11
2.2.1 Οξείδια του θείου (SO <sub>x</sub> ) και οξείδια του αζώτου (NO <sub>x</sub> ).....	12
2.2.2 Διοξείδιο του άνθρακα (CO <sub>2</sub> ) .....	15
2.3 EU MRV.....	16
2.4 IMO DCS.....	17
<b>3. Μέθοδοι υπολογισμού αερίων εκπομπών από τα πλοία.....</b>	<b>18</b>
3.1 Μέθοδος Top-down .....	18
3.2 Μέθοδος Bottom-up ή Activity-based .....	19
3.2.1 Μέθοδος EPA (Environmental Protection Agency, USA) .....	20
3.2.2 Μέθοδος MAN.....	20
3.2.3 Μέθοδος IMO.....	21
3.2.4 Μέθοδος Jalkanen.....	21
3.3 Συγκριτική ανάλυση μεθόδων .....	22
<b>4. Αναλυτική περιγραφή του υπολογιστικού εργαλείου .....</b>	<b>24</b>
4.1 Χαρακτηριστικά της μεθοδολογίας που επιλέχθηκε .....	24
4.1.1 Μαθηματικό μοντέλο.....	25
4.1.2 Load Factor (LF) .....	25
4.1.3 Emission Factor (EF) .....	27
4.1.4 Ειδική κατανάλωση καυσίμου (Specific Fuel Oil Consumption, SFOC).....	28
4.1.5 Συντελεστής επίδρασης καιρού (Weather Factor, n <sub>w</sub> ).....	29
4.1.6 Συντελεστής επίδρασης ρύπανσης της γάστρας (Fouling Factor, n <sub>f</sub> ) .....	29
4.2 Περιγραφή λειτουργίας υπολογιστικού εργαλείου.....	30
4.2.1 Δεδομένα εισόδου (Input) .....	30

4.2.2 Υπολογισμοί .....	32
4.2.3 Δεδομένα εξόδου (Output) .....	34
4.3 Εναλλακτικοί τρόποι υπολογισμού παραμέτρων .....	35
4.3.1 Ειδική κατανάλωση καυσίμου ( $SFOC_{real}$ ) .....	36
4.3.2 Πραγματική ταχύτητα κατά τον υπολογισμό.....	37
4.3.3 Πραγματικό βύθισμα κατά τον υπολογισμό.....	38
<b>5. Σύγκριση αποτελεσμάτων μεθόδων με εγγραφές MRV .....</b>	<b>39</b>
5.1 Δεδομένα εφαρμογής .....	39
5.2 Αποτελέσματα εφαρμογής .....	41
5.2.1 Συνολικές εκπομπές CO <sub>2</sub> .....	41
5.2.2 Απόκλιση αποτελεσμάτων μεθόδων από MRV για κάθε πλοίο .....	42
5.3 Παράγοντες που συμβάλλουν στην απόκλιση των αποτελεσμάτων από τον MRV.....	45
<b>6. Ανάλυση ευαισθησίας.....</b>	<b>46</b>
6.1 Βήματα διαδικασίας.....	46
6.2 Αποτελέσματα .....	47
6.2.1 Πραγματική ταχύτητα .....	48
6.2.2 Πραγματικό βύθισμα .....	49
6.2.3 Συντελεστής επίδρασης καιρού (Weather factor, $n_w$ ) .....	50
6.2.4 Συντελεστής επίδρασης ρύπανσης της γάστρας (Fouling factor, $n_f$ ) .....	51
6.3 Συμπεράσματα .....	52
<b>7. Πλήρης εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου .....</b>	<b>53</b>
7.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων ανά τύπο πλοίου.....	54
7.1.1 Παραγωγή συνολικών αερίων εκπομπών ανά τύπο πλοίου .....	54
7.1.2 Παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα (CO <sub>2</sub> ) ανά τύπο πλοίου .....	55
7.1.3 Παραγωγή ατμοσφαιρικών ρύπων ανά τύπο πλοίου.....	57
7.1.4 Αναλογία αερίων εκπομπών ανά τύπο πλοίου.....	60
7.1.5 Ανάλυση αποτελεσμάτων με βάση την ταχύτητα ανά τύπο πλοίου .....	68
7.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων ανά τύπο αέριας εκπομπής .....	73
7.2.1 Αναλογία συνολικών παραγόμενων αερίων εκπομπών.....	73
7.2.2 Αναλογία συνολικών παραγόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων .....	74
7.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων με βάση την ηλικία του πλοίου .....	75
7.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων με αντίστοιχα άλλων ερευνών .....	78
7.4.1 Συνολικές εκπομπές CO <sub>2</sub> ανά τύπο πλοίου.....	78
7.4.2 Αναλογία συνολικών παραγόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων .....	81

<b>8. Εφαρμογή με χρήση στοιχείων από βάσεις δεδομένων .....</b>	<b>82</b>
8.1 Αποτελέσματα εφαρμογής .....	82
<b>9. Συμπεράσματα .....</b>	<b>85</b>
<b>10. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....</b>	<b>88</b>
<b>11. Βιβλιογραφία.....</b>	<b>89</b>

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η κατασκευή ενός υπολογιστικού εργαλείου για τον αναλυτικό υπολογισμό των αερίων εκπομπών από τη λειτουργία των πλοίων. Ένα τέτοιο εργαλείο μπορεί να συνεισφέρει στη λήψη κατάλληλων μέτρων για τη μείωση των αερίων εκπομπών. Επιπλέον, μπορεί να βοηθήσει στην τήρηση των μέτρων που ορίζουν οι υπάρχοντες κανονισμοί.

Αρχικά, γίνεται αναφορά των κύριων αερίων εκπομπών που προέρχονται από τη ναυτιλία και των αντίστοιχων συνεπειών τους τόσο στο περιβάλλον όσο και στην ανθρώπινη υγεία. Επιπροσθέτως, παρατίθενται όλοι οι σχετικοί κανονισμοί που έχουν υιοθετηθεί σε επίπεδο Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) αλλά και Ευρωπαϊκής Ένωσης με σκοπό τη μείωση των αερίων εκπομπών από τα πλοία.

Εν συνεχεία, παρουσιάζονται οι υπάρχουσες μέθοδοι υπολογισμού των εν λόγω εκπομπών και ύστερα από τη συγκριτική τους ανάλυση, γίνεται η επιλογή εκείνης που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία.

Με βάση το μαθηματικό μοντέλο που διέπει τη μέθοδο που επιλέχθηκε, αναπτύσσεται κώδικας στη γλώσσα προγραμματισμού Python για την κατασκευή του υπολογιστικού εργαλείου. Το εν λόγω εργαλείο δέχεται ως δεδομένα ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά ενός ή περισσότερων πλοίων και υπολογίζει τις συνολικές αέριες εκπομπές που παράγουν. Παράλληλα, παρέχει τη δυνατότητα ανάλυσης των αποτελεσμάτων ανά τύπο πλοίου, ανά τύπο αέριας εκπομπής αλλά και με βάση την ταχύτητα και την ηλικία των πλοίων. Η λογική του προγράμματος είναι ότι «διαβάζει» ένα αρχείο excel με τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου και παράγει ένα νέο αρχείο excel με τις παραγόμενες αέριες εκπομπές κάθε πλοίου αλλά και κατάλληλους πίνακες και ειδικά διαμορφωμένα διαγράμματα για την παρουσίαση και την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Σημειώνεται πως το υπολογιστικό εργαλείο αφορά τέσσερις τύπους πλοίων και συγκεκριμένα τους τύπους Bulk Carrier, Tanker, Container και Ro-Ro. Επιπλέον, το υπολογιστικό εργαλείο υπολογίζει τις εκπομπές τεσσάρων αερίων και συγκεκριμένα του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), των οξειδίων του θείου (SO<sub>x</sub>), των οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και των αιωρούμενων σωματιδίων (PM).

Στη συνέχεια, γίνεται μία πρώτη εφαρμογή κατά την οποία συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από διαφορετικές μεθόδους με τις αντίστοιχες εγγραφές του MRV για το έτος 2018.

Ακολουθεί η ανάλυση ευαισθησίας του υπολογιστικού εργαλείου κατά την οποία διαπιστώνεται πόσο επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα η μεταβολή κάθε μίας μεμονωμένης μεταβλητής του προγράμματος.

Έπειτα, πραγματοποιείται μία πλήρης εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου σε ένα τυχαίο δείγμα εκατό πλοίων. Μέσω της εφαρμογής αυτής παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα και οι αναλύσεις που παρέχει το εργαλείο καθώς και η εξαγωγή των αντίστοιχων συμπερασμάτων.

Τέλος, πραγματοποιείται μία εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου με την χρήση στοιχείων για την κίνηση ενός πλοίου από τις καταγραφές του δορυφορικού συστήματος AIS. Η εφαρμογή αυτή αναδεικνύει τη δυνατότητα του υπολογιστικού εργαλείου να αξιοποιεί στοιχεία από βάσεις δεδομένων που ενημερώνονται σε πραγματικό χρόνο μέσω δορυφόρου για τον υπολογισμό των αερίων εκπομπών από τη λειτουργία ενός ή περισσότερων πλοίων.

## Abstract

The purpose of this diploma thesis is the development of a tool for calculating ship air emissions. A tool like this can contribute to establish appropriate measures for reducing air emissions. It can also help shipping industry to comply with the existing Regulations.

First of all, this thesis presents the main air emissions that are produced by ships, describing their impact not only on the environment but also on human health. It also includes all the measures for ship air emissions reduction that have been taken by International Maritime Organization (IMO) and European Union (EU) through their Regulations.

In addition, there is a presentation of all the existing methods of estimating ship air emissions. Moreover, a comparative analysis of those methods takes place in order to choose which one will be used in this diploma thesis.

The emissions tool was developed by using the programming language Python. This tool takes as input some main particulars of one or more ships and calculates the air emissions that they produce. In addition, the tool provides tables and diagrams for the analysis of the results by ship type, emission type, speed and age of ships. Specifically, the tool 'reads' an excel file which includes the input data and then produces a new excel file with the results of air emissions as well as tables and diagrams for the appropriate analysis.

The emissions tool that was developed in this diploma thesis is about four ship types: Bulk Carrier, Tanker, Container, Ro-Ro. In addition, this tool calculates four specific air emissions: carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), sulphur oxides (SO<sub>x</sub>), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) and particulate matters (PM).

After the development of the tool, a short application of the program takes place in order to compare the results with the relative records of European Regulation MRV for 2018. For this application, the particulars of 100 ships were collected in order to calculate their CO<sub>2</sub> emissions for 2018.

Then, a sensitivity analysis of the tool is conducted in order to note how changes of a single parameter affect its results and identify the most critical one.

Furthermore, a first complete application of this tool takes place. For this application the particulars of 100 ships that departed from or arrived at ports of the European Economic Area (EEA) in 2018 were collected. By using those data, the program calculates the air emissions that those ships produced in 2018. The goal of this application is to present the results and the complete analysis that can be provided by the emissions tool.



Finally, there is another application of the emissions tool that was developed in this diploma thesis. The particulars of a Bulk Carrier were collected for this last application. Then, the data for its movement in Baltic Sea for 24 hours were collected from a website that has access in the records of Automatic Identification System (AIS). The goal of this application is to highlight the capability of this tool to use real time data from AIS, in order to calculate ship air emissions and produce results of great accuracy.

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Αέριες εκπομπές και ναυτιλία

Η ναυτιλία αποτελεί έναν τομέα που ελκύει το παγκόσμιο ενδιαφέρον, δεδομένου πως περισσότερο από το 80% του όγκου του παγκόσμιου εμπορίου μεταφέρεται μέσω πλοίων. Ένα από τα θέματα που απασχολεί όλο και περισσότερο την παγκόσμια κοινότητα είναι η αρνητική επίδραση της ναυτιλίας στο περιβάλλον και ειδικότερα στην ατμόσφαιρα. Τόσο σε επίπεδο Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) όσο και σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης, τα τελευταία χρόνια θεσπίζονται πρακτικά και δραστικά μέτρα για τη μείωση των αερίων εκπομπών από τα πλοία. Όλα αυτά τα μέτρα έχουν ως σκοπό την ένταξη της ναυτιλίας στην προσπάθεια αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής. Τα πλοία λόγω των μεγάλων κινητήρων και των βαρέων καυσίμων που χρησιμοποιούν (τα περισσότερα εξ αυτών χρησιμοποιούν Heavy Fuel Oil, HFO) αποτελούν σημαντικές πηγές αερίων εκπομπών, επιβαρύνοντας έτσι με τη λειτουργία τους το περιβάλλον. Οι αέριες εκπομπές από τα πλοία μπορούν να διακριθούν σε δύο βασικές κατηγορίες, τα αέρια του θερμοκηπίου και τους ατμοσφαιρικούς ρύπους. Στην πρώτη κατηγορία, όπως γίνεται κατανοητό, ανήκουν τα αέρια που συμβάλλουν στην ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Στη δεύτερη κατηγορία, εκείνη των ατμοσφαιρικών ρύπων, ανήκουν τα αέρια που έχουν αρνητική επίδραση στην ποιότητα της ατμόσφαιρας προκαλώντας τη ρύπανσή της. Γίνεται λοιπόν σαφές πως τα αέρια του θερμοκηπίου προκαλούν προβλήματα παγκόσμιου ενδιαφέροντος ενώ οι ατμοσφαιρικοί ρύποι ευθύνονται για προβλήματα περισσότερο τοπικού χαρακτήρα.

### 1.1.2 Αέρια του θερμοκηπίου

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου αποτελεί μία φυσική διαδικασία η οποία είναι απαραίτητη για τη διατήρηση φυσιολογικών θερμοκρασιών στη Γη, προκειμένου να μπορεί να υπάρξει ζωή πάνω σε αυτήν. Η ακτινοβολία του ήλιου απορροφάται σε ένα βαθμό από την επιφάνεια της Γης και το υπόλοιπο μέρος ανακλάται πίσω στο διάστημα. Τα αέρια του θερμοκηπίου σχηματίζουν ένα «στρώμα» το οποίο επιτρέπει μεν τη διέλευση της ακτινοβολίας του ήλιου στη Γη αλλά ταυτόχρονα εγκλωβίζει ένα μέρος της ακτινοβολίας που ανακλάται, εξασφαλίζοντας την απαραίτητη θερμότητα για την επικράτηση φυσιολογικών θερμοκρασιών. Το πρόβλημα του φαινομένου του θερμοκηπίου που συζητείται έντονα αφορά ουσιαστικά το ενισχυμένο φαινόμενο του θερμοκηπίου, δηλαδή την αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου από την ανθρώπινη δραστηριότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εγκλωβίζονται στην ατμόσφαιρα πολύ μεγάλες ποσότητες θερμότητας που οδηγούν στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Τα αέρια του θερμοκηπίου που παράγονται από τα πλοία είναι κυρίως το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και σε μικρότερες ποσότητες το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) (IMO, 2014).

Το διοξείδιο του άνθρακα θεωρείται ένα από τα κύρια αέρια που ευθύνονται για το ενισχυμένο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Όσον αφορά τη ναυτιλία, η παραγωγή του οφείλεται στην καύση των καυσίμων για τη λειτουργία των μηχανών του πλοίου. Μελέτη του IMO έδειξε πως από τη ναυτιλία προέρχεται μόλις το 2,5% των παγκοσμίων εκπομπών CO<sub>2</sub> (IMO, 2014). Εντούτοις, η ναυτιλιακή κοινότητα δέχεται όλο και περισσότερες πιέσεις για τη λήψη μέτρων με στόχο την περαιτέρω μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> από τα πλοία.

### 1.1.3 Ατμοσφαιρικοί ρύποι

Ατμοσφαιρική ρύπανση καλείται η παρουσία στην ατμόσφαιρα ρύπων σε ποσότητα, συγκέντρωση ή διάρκεια που μπορούν να προκαλέσουν αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία, στους ζωντανούς οργανισμούς και στα οικοσυστήματα ή υλικές ζημιές που καθιστούν το περιβάλλον ακατάλληλο για τις επιθυμητές χρήσεις του. Όπως αναφέρθηκε λοιπόν, οι επιπτώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων έχουν περισσότερο τοπικό χαρακτήρα. Για τον λόγο αυτό, πέραν των μέτρων σε παγκόσμιο επίπεδο, ο IMO έχει θεσπίσει πιο ειδικά και αυστηρά μέτρα σε συγκεκριμένες περιοχές. Οι κυριότεροι ατμοσφαιρικοί ρύποι που παράγονται από τη ναυτιλία είναι τα οξειδία του θείου (SO<sub>x</sub>), τα οξειδία του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και τα αιωρούμενα σωματίδια (PM) (IMO, 2014). Άλλοι ατμοσφαιρικοί ρύποι που εκπέμπονται σε μικρότερες ποσότητες κατά τη λειτουργία των πλοίων είναι το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) και η αιθάλη (BC).

Τα οξειδία του θείου (SO<sub>x</sub>) προκαλούν βλάβες στη βιοποικιλότητα του οικοσυστήματος και άλλα σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως η οξίνιση των εδαφών και του αέρα. Επιπροσθέτως, τα SO<sub>x</sub> προκαλούν προβλήματα και στην ανθρώπινη υγεία, με το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>) ειδικότερα να θεωρείται υπεύθυνο για τη δημιουργία προβλημάτων του αναπνευστικού. Η εκπομπή των SO<sub>x</sub> από τα πλοία εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο καύσιμο και την περιεκτικότητά του σε θείο.

Τα οξειδία του αζώτου (NO<sub>x</sub>) προκαλούν επίσης διάφορα προβλήματα τόσο στην ανθρώπινη υγεία όσο και στο περιβάλλον. Συγκεκριμένα, τα NO<sub>x</sub> συμβάλλουν στην δημιουργία όζοντος κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, γεγονός που προκαλεί προβλήματα του αναπνευστικού. Επιπλέον, τα NO<sub>x</sub> συμβάλλουν στο φαινόμενο της όξινης βροχής, η οποία προκαλεί προβλήματα στο οικοσύστημα αλλά και φθορές σε ιστορικά μνημεία και κτήρια. Αξιοσημείωτο είναι πως ένας τύπος NO<sub>x</sub>, το υποξείδιο του αζώτου (N<sub>2</sub>O), θεωρείται πως συμβάλλει και στο ενισχυμένο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η εκπομπή των NO<sub>x</sub> από τα πλοία εξαρτάται από τον τύπο του κινητήρα και τα χαρακτηριστικά του.

Τα αιωρούμενα σωματίδια (PM) διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, τα εισπνεύσιμα σωματίδια με διάμετρο έως 10 μm γνωστά ως PM<sub>10</sub>, τα θωρακικά σωματίδια με διάμετρο έως 7μm και τα αναπνεύσιμα σωματίδια με διάμετρο έως 2,5 μm γνωστά ως PM<sub>2,5</sub> (Οξενκιουν-Πετροπούλου, 2010). Τα PM ευθύνονται για τη δημιουργία αναπνευστικών προβλημάτων και την εμφάνιση καρδιακών παθήσεων. Επιπλέον, τα PM απορροφούνται από τα φυτά προκαλώντας και σε αυτά διάφορα προβλήματα όπως η χλωρίωση.

Το πρώτο βήμα για τη μείωση των εκπομπών όλων των παραπάνω αερίων και τον περιορισμό των συνεπειών που αναφέρθηκαν, είναι η δυνατότητα καταγραφής τους. Σε αυτή την κατεύθυνση, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η κατασκευή ενός υπολογιστικού εργαλείου για τον αναλυτικό υπολογισμό των αερίων εκπομπών από τη λειτουργία των πλοίων. Η χρήση εργαλείων σαν και αυτό, δίνοντας μία πλήρη εικόνα της τρέχουσας κατάστασης, μπορούν να συμβάλλουν τόσο στη διαμόρφωση νέων μέτρων που πρέπει να ληφθούν όσο και στον έλεγχο υλοποίησης των υπαρχόντων μέτρων και τήρησης των ορίων που προδιαγράφουν οι σχετικοί κανονισμοί.

## 2. Ισχύουσες απαιτήσεις και κανονισμοί

### 2.1 Η συμφωνία του Κιότο

Η πρώτη φορά που οι βιομηχανικές χώρες συμφώνησαν και δεσμεύτηκαν στη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, πραγματοποιήθηκε το 1997 στο Κιότο. Η εν λόγω συμφωνία, γνωστή ως Πρωτόκολλο του Κιότο, αποτέλεσε ουσιαστικά την αποδοχή των επιστημονικών ανησυχιών για την κλιματική αλλαγή και της ανάγκης για λήψη πρακτικών μέτρων με σκοπό την αντιμετώπισή της. Συγκεκριμένα, ο στόχος των χωρών αφορούσε αρχικά το διάστημα 2008 - 2012 για τον έλεγχο και τον περιορισμό των εκπομπών έξι βασικών αερίων του θερμοκηπίου. Τα αέρια αυτά είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>), το υποξείδιο του αζώτου (N<sub>2</sub>O), οι υδροφθοράνθρακες (HFCs), οι υπερφθοράνθρακες (PFCs) και το εξαφθοριούχο θείο (SF<sub>6</sub>). Για τον σκοπό αυτό καθορίστηκαν διαφοροποιημένοι εθνικοί στόχοι, επί παραδείγματι μείωση 8 % για την Ευρωπαϊκή Ένωση και μείωση 7 % για τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Επιπλέον, καθιερώθηκε το διεθνές σύστημα εμπορίας εκπομπών, το οποίο επιτρέπει στις βιομηχανικές χώρες με αδυναμία επίτευξης του στόχου μείωσης να «αγοράζουν» και εκείνες που ξεπερνούν τον αντίστοιχο στόχο να «πωλούν» δικαιώματα εκπομπών. Σημειώνεται πως η ναυτιλία δεν συμπεριλήφθηκε στη συνθήκη του Κιότο και η υποχρέωση θέσπισης των απαραίτητων κανονισμών σχετικά με τη μείωση των αερίων εκπομπών από τα πλοία, αποδόθηκε στον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO).

### 2.2 Διεθνής Σύμβαση για την Αποφυγή της Ρύπανσης από τα Πλοία, MARPOL 73/78

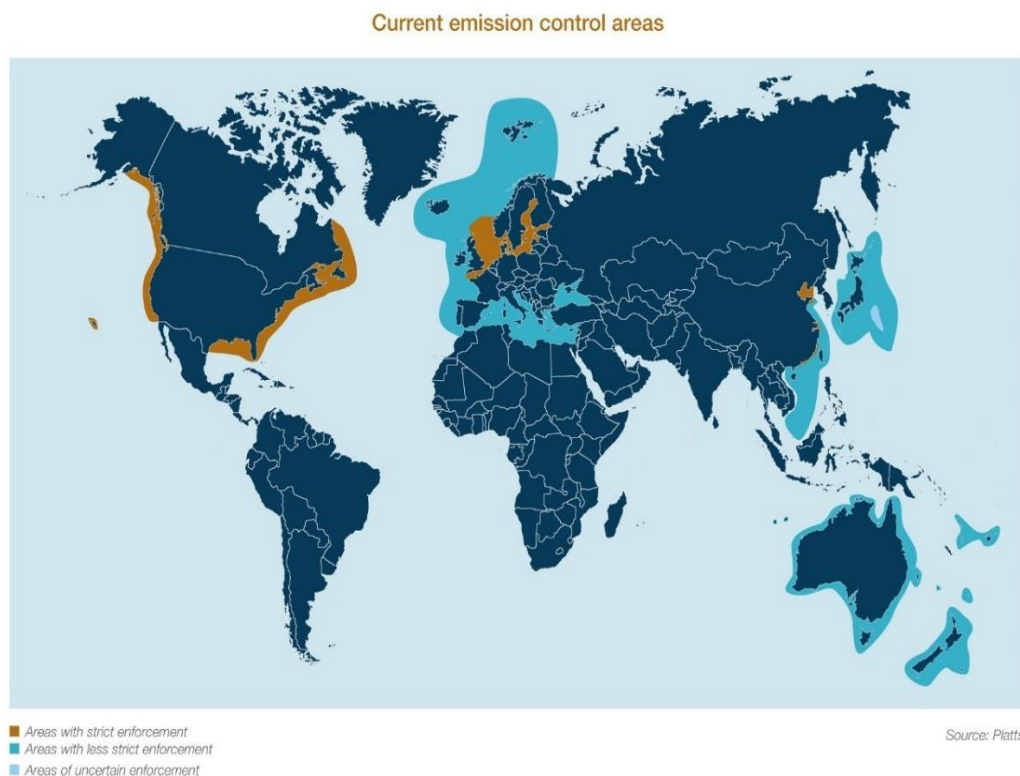
Το 1973 υπεγράφη από τα κράτη - μέλη του IMO η Διεθνής Σύμβαση για την Αποφυγή της Ρύπανσης από τα Πλοία. Με τα κοινοβούλια των χωρών όμως να καθυστερούν την υιοθέτησή της, η Σύμβαση δεν εφαρμόστηκε άμεσα. Έτσι το 1978, ύστερα από μία σειρά ατυχημάτων πλοίων με σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ο IMO υιοθέτησε επιπλέον μέτρα τροποποιώντας την αρχική Σύμβαση του 1973, η οποία δεν είχε ακόμα εφαρμοστεί. Τελικά, η Διεθνής Σύμβαση για την Αποφυγή της Ρύπανσης από τα Πλοία, γνωστή ως MARPOL 73/78, τέθηκε σε ισχύ το 1983. Από τότε έχουν γίνει αρκετές αναθεωρήσεις της Σύμβασης, με την πρόσθεση καινούργιων κεφαλαίων για την αντιμετώπιση των συνεχώς αυξανόμενων απαιτήσεων σχετικά με την αποφυγή της ρύπανσης από τα πλοία. Στη σημερινή τους μορφή, οι Κανονισμοί της MARPOL είναι συγκεντρωμένοι στα ακόλουθα έξι κεφάλαια που εμφανίζονται στη Σύμβαση ως προσαρτήματα (Annexes):

- I. Κανονισμοί για την Αποφυγή της Ρύπανσης από Πετρελαιοειδή
- II. Κανονισμοί για τον Έλεγχο της Ρύπανσης από Επιβλαβείς Υγρές Ουσίες σε Χύδην Μορφή
- III. Κανονισμοί για την Αποφυγή της Ρύπανσης από Επιβλαβείς Ουσίες που Μεταφέρονται δια Θαλάσσης σε Συσκευασμένες Μορφές ή σε Εμπορευματοκιβώτια, Φορητές Δεξαμενές ή Οδικά και Σιδηροδρομικά Βαγόνια
- IV. Κανονισμοί για την Αποφυγή της Ρύπανσης από Λύματα Πλοίων
- V. Κανονισμοί για την Αποφυγή της Ρύπανσης από Απορρίμματα Πλοίων
- VI. Κανονισμοί για την Αποφυγή της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης από τα Πλοία

Το προσάρτημα VI της MARPOL που αφορά την ατμοσφαιρική ρύπανση εγκρίθηκε το 1997 και τέθηκε σε ισχύ το 2005. Στην αρχική του εκδοχή το προσάρτημα αυτό αποσκοπούσε στη μείωση των οξειδίων του θείου (SOx) που απελευθερώνονται κατά την καύση των ναυτικών καυσίμων και των οξειδίων του αζώτου (NOx) που εκπέμπονται από τους κινητήρες Diesel, χωρίς να θέτει περιορισμούς για την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου. Το 2008 η Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (Marine Environmental Protection Committee, MEPC) του IMO ενέκρινε τις προτεινόμενες τροποποιήσεις του προσαρτήματος VI της MARPOL υιοθετώντας περαιτέρω μέτρα για την εκπομπή SOx και NOx, με αυστηρότερα όρια αλλά και τη δημιουργία των Περιοχών Ελέγχου Εκπομπών (Emission Control Areas, ECAs). Τέλος, το 2011 υπήρξε νέα τροποποίηση με την οποία θεσπίστηκαν τεχνικά και λειτουργικά μέτρα για τον περιορισμό των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, τα οποία βασίζονται στον υπολογισμό του δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας (Energy Efficiency Design Index, EEDI). Το περιεχόμενο του προσαρτήματος VI της MARPOL παρουσιάζεται αναλυτικότερα στις ακόλουθες παραγράφους.

### 2.2.1 Οξείδια του θείου (SOx) και οξείδια του αζώτου (NOx)

Όπως αναφέρθηκε, οι πρώτοι ατμοσφαιρικοί ρύποι που άρχισαν να απασχολούν τη ναυτιλία και για τους οποίους θεσπίστηκαν τα αντίστοιχα μέτρα περιορισμού ήταν τα οξείδια του θείου (SOx) και τα οξείδια του αζώτου (NOx). Λόγω των πολύ σημαντικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε τοπικό επίπεδο, πέραν των απαιτήσεων σχετικά με τις εκπομπές ρύπων σε παγκόσμια κλίμακα, έχουν καθοριστεί και πιο αυστηρές απαιτήσεις σε επιμέρους περιοχές γνωστές ως Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών (Emission Control Areas, ECAs). Αρχικά, οι ECAs αποτελούνταν από τη Θάλασσα της Βαλτικής και τη Βόρεια Θάλασσα. Στην συνέχεια σε αυτές προστέθηκαν η Βόρεια Αμερική και οι Θάλασσες της Καραϊβικής. Η ακόλουθη εικόνα αποτυπώνει την τρέχουσα διαμόρφωση των ECAs.

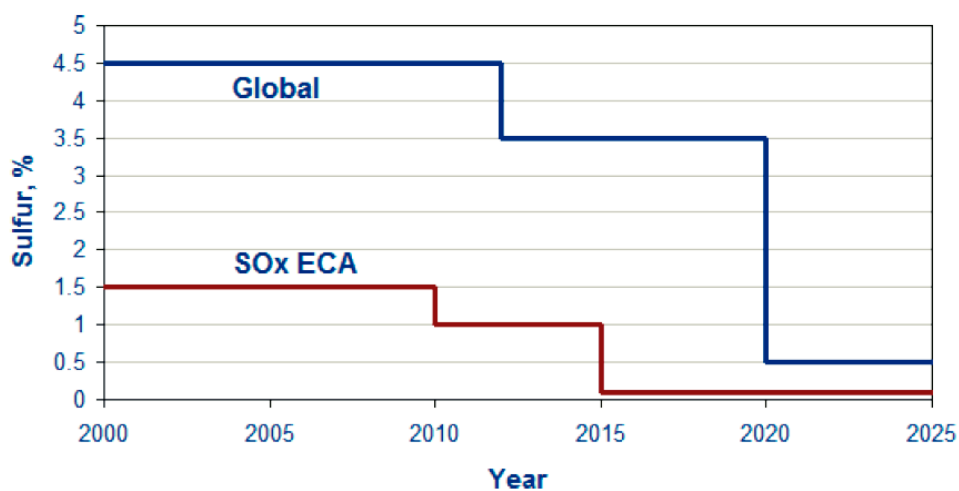


Εικόνα 1: Τρέχουσες Emissions Control Areas. Πηγή: [www.gpca.org.ae](http://www.gpca.org.ae)

Όσον αφορά τις απαιτήσεις σχετικά με τον περιορισμό των εκπομπών SOx, ο IMO έχει θέσει όρια για το θείο που εμπεριέχεται στα χρησιμοποιούμενα καύσιμα από τα πλοία. Συγκεκριμένα, δεν έχει τεθεί απευθείας απαίτηση για την χρήση ή την αποφυγή της χρήσης συγκεκριμένου καυσίμου, αρκεί να ικανοποιούνται τα όρια των κανονισμών. Σημειώνεται πως για τη μείωση των εκπομπών SOx επιτρέπονται εναλλακτικά μέτρα όπως η χρήση scrubbers ή οποιασδήποτε άλλης πιστοποιημένης τεχνολογικής μεθόδου, όπως η εγκατάσταση ενός συστήματος καθαρισμού των καυσαερίων. Τα εν λόγω όρια του θείου που εμπεριέχεται στα καύσιμα που χρησιμοποιούνται από τα πλοία αποτυπώνονται στον πίνακα και το διάγραμμα που ακολουθούν.

**Πίνακας 1: Όρια περιεκτικότητας θείου στα καύσιμα, MARPOL Annex VI**

Ημερομηνία Εφαρμογής	Όριο θείου στο καύσιμο (% m/m)	
	Εντός ECA (SECA)	Παγκόσμιο
2000	1,5 %	4,5 %
2010	1,0 %	
2012	0,1 %	3,5 %
2015		0,5 %
2020		0,5 %

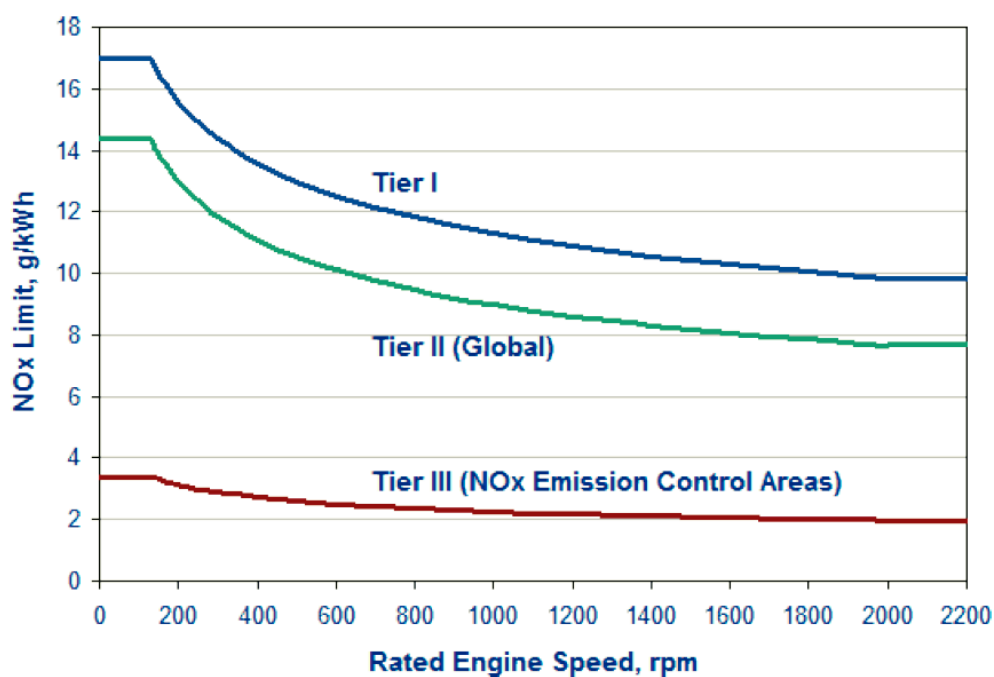


**Σχήμα 1: Όρια περιεκτικότητας θείου στα καύσιμα, MARPOL Annex VI**

Όσον αφορά τις απαιτήσεις σχετικά με τον περιορισμό των εκπομπών NO<sub>x</sub>, ο IMO έχει θέσει όρια με βάση τις μέγιστες στροφές *n* των κινητήρων Diesel και την ημερομηνία κατασκευής του πλοίου. Μετά την επιθεώρηση του πλοίου, για την επιβεβαίωση της ικανοποίησης των απαιτήσεων των σχετικών κανονισμών είναι απαραίτητο να εκδοθεί το πιστοποιητικό Engine International Air Pollution Prevention (EIAPP). Τα εν λόγω όρια των εκπομπών NO<sub>x</sub> αποτυπώνονται στον πίνακα και το σχήμα που ακολουθούν. Σημειώνεται πως τα πλοία που ταξιδεύουν εντός ECA πρέπει να ικανοποιούν τα αυστηρότερα όρια των κανονισμών (Tier III στον πίνακα και το αντίστοιχο σχήμα).

Πίνακας 2: Όρια NO<sub>x</sub>, MARPOL Annex VI

Κατηγορία	Ημερομηνία κατασκευής πλοίου	Όριο NO <sub>x</sub> (g/kWh)		
		$n < 130 \text{ RPM}$	$130 \text{ RPM} \leq n < 2000 \text{ RPM}$	$n \geq 2000 \text{ RPM}$
Tier I	2000	17,0	$45 \cdot n^{-0,2}$	9,8
Tier II	2011	14,4	$44 \cdot n^{-0,23}$	7,7
Tier III	2016	3,4	$9 \cdot n^{-0,2}$	2,0



Σχήμα 2: Όρια NO<sub>x</sub>, MARPOL Annex VI

### 2.2.2 Διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>)

Ένα από τα κυριότερα μέτρα που έχει θεσπίσει ο IMO για τη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) είναι ο Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (Energy Efficiency Design Index, EEDI). Ο EEDI υπολογίζεται στο στάδιο σχεδίασης ενός πλοίου και εκφράζει την παραγωγή CO<sub>2</sub> (σε γραμμάρια) ανά μονάδα μεταφορικής ικανότητας (τόνοι - μίλια). Στην πλήρη του μορφή, ο δείκτης EEDI υπολογίζει τις εκπομπές CO<sub>2</sub> με βάση την ισχύ και την κατανάλωση των κύριων και βοηθητικών μηχανών του πλοίου, τις οποίες διαιρεί με το μεταφερόμενο φορτίο επί την απόσταση που αυτό μεταφέρεται. Η λογική του EEDI λοιπόν μπορεί να αποτυπωθεί στην παρακάτω σχέση:

$$EEDI = \frac{CO_2 \text{ Emissions [g]}}{DWT [t] \cdot Distance [nm]}$$

Όσο μικρότερη είναι η τιμή του δείκτη EEDI, τόσο ενεργειακά αποδοτικότερο θεωρείται το πλοίο. Σε κάθε περίπτωση, η τιμή του EEDI πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση από τα αντίστοιχα επιτρεπόμενα όρια που καθορίζει ο IMO με βάση τον τύπο του πλοίου (IMO, 2009).

Ένα άλλο μέτρο που έχει υιοθετήσει ο IMO για τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> είναι το Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP). Πρόκειται για ένα λειτουργικό μέτρο που διαμορφώνει έναν μηχανισμό με σκοπό τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας του πλοίου. Συγκεκριμένα, το SEEMP αφορά στην καταγραφή της κατανάλωσης καυσίμου και τη μέτρηση της ενεργειακής αποδοτικότητας του πλοίου εν ώρα λειτουργίας, έτσι ώστε να γίνεται ο απαραίτητος προγραμματισμός και να λαμβάνονται οι αντίστοιχες πρωτοβουλίες για τον τρόπο που θα συνεχίσει να λειτουργεί το πλοίο. Ο IMO συνιστά την υλοποίηση του εν λόγω μέτρου μέσω της χρήσης του δείκτη EEOI (Energy Efficiency Operational Indicator). Ο δείκτης αυτός υπολογίζεται ως εξής:

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j \cdot C_{Fj}}{m_{cargo} \cdot D}$$

όπου

j: τύπος καυσίμου

FC<sub>j</sub>: συνολική κατανάλωση καυσίμου

C<sub>Fj</sub>: συντελεστής μετατροπής κατανάλωσης καυσίμου σε εκπομπές CO<sub>2</sub>

m<sub>cargo</sub>: βάρος μεταφερόμενου φορτίου

D: απόσταση μεταφοράς φορτίου



### 2.3 EU MRV

Στα πλαίσια ένταξης της ναυτιλίας στην προσπάθεια αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο υιοθέτησε το 2015 τον Κανονισμό για την παρακολούθηση, την αναφορά και την επαλήθευση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) από τα πλοία (Monitoring, Reporting and Verification, MRV). Σύμφωνα με τον MRV, οι πλοιοκτήτριες εταιρείες απαιτείται να καταγράφουν και να αναφέρουν τα ετήσια δεδομένα για την κατανάλωση καυσίμου, την εκπομπή CO<sub>2</sub> και άλλα σχετικά στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά καταχωρούνται ανά ταξίδι, για όλα τα ταξίδια που πραγματοποιεί το πλοίο κατά τη διάρκεια του έτους. Εν συνεχεία, τα δεδομένα αυτά επαληθεύονται από ανεξάρτητες και πιστοποιημένες για τον σκοπό αυτό εταιρείες, προκειμένου να διασφαλιστεί η εγκυρότητα των στοιχείων και η τήρηση των προδιαγραφών του Κανονισμού. Τέλος, τα επαληθευμένα αποτελέσματα δημοσιεύονται επίσημα στην ετήσια αναφορά της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Το πρώτο έτος εφαρμογής του MRV ήταν το 2018, με τα αποτελέσματα να δημοσιεύονται αρχικά διαδικτυακά το 2019 και έπειτα στην αναφορά της Ευρωπαϊκής Επιτροπής το 2020. Ο εν λόγω Κανονισμός αφορά τα πλοία χωρητικότητας άνω των 5000 GT, τα οποία ταξιδεύουν από ή προς λιμάνια του Ευρωπαϊκού Οικονομικού Χώρου (European Economic Area, EEA). Σημειώνεται πως ο EEA αποτελείται από τις χώρες - μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης και το Ηνωμένο Βασίλειο, την Ισλανδία, το Λιχτενστάιν και τη Νορβηγία.

Η εφαρμογή του MRV βασίζεται στην παρακολούθηση και την καταγραφή της κατανάλωσης καυσίμου πάνω στο πλοίο, για κάθε ταξίδι κατά τη διάρκεια του έτους. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα των καταγραφών αυτών πολλαπλασιάζονται με έναν ειδικό συντελεστή, τον λεγόμενο Emission Factor (EF), ο οποίος μετατρέπει την ποσότητα καυσίμου που καταναλώθηκε σε ποσότητα εκπομπών CO<sub>2</sub> (Lighthouse, 2018). Η τιμή του EF λαμβάνεται από πίνακες που έχει δημοσιεύσει ο IMO (IMO, 2014).

Συνοπτικά, η διαδικασία εφαρμογής του MRV αποτυπώνεται στα ακόλουθα έξι βήματα:

- Δημιουργία του Monitoring Plan μέσω του οποίου οι πλοιοκτήτριες εταιρείες αποφασίζουν και γνωστοποιούν τη διαδικασία που θα ακολουθήσουν για την εφαρμογή του Κανονισμού
- Παρακολούθηση και καταγραφή των απαιτούμενων δεδομένων από τις πλοιοκτήτριες εταιρείες
- Καταχώρηση στη βάση δεδομένων του MRV της αναφοράς με τα δεδομένα για τις εκπομπές CO<sub>2</sub> από τις πλοιοκτήτριες εταιρείες
- Επαλήθευση των δεδομένων από ανεξάρτητες πιστοποιημένες εταιρείες
- Καταχώρηση στη βάση δεδομένων του MRV του Document of Compliance από τις εταιρείες επαλήθευσης, μέσω του οποίου επιβεβαιώνεται η εγκυρότητα των δεδομένων και η συμμόρφωση με τον Κανονισμό
- Δημοσίευση των αποτελεσμάτων μέσω της ετήσιας αναφοράς της Ευρωπαϊκής Επιτροπής

Για την υλοποίηση της ανωτέρω διαδικασίας, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή και η EMSA (European Maritime Safety Agency) εγκαθίδρυσαν ένα διαδικτυακό εργαλείο, το THETIS-MRV. Πρόκειται για το εργαλείο μέσω του οποίου οι πλοιοκτήτριες εταιρείες και οι εταιρείες επαλήθευσης μπορούν να καταχωρήσουν τις αναφορές τους στη βάση δεδομένων του MRV.

## 2.4 IMO DCS

Ακολουθώντας τη λογική του Ευρωπαϊκού Κανονισμού MRV, ο IMO εισήγαγε το 2016 το σύστημα συλλογής δεδομένων για την κατανάλωση καυσίμου από τα πλοία (IMO Data Collection System, DCS). Σύμφωνα με το DCS, όλα τα πλοία χωρητικότητας άνω των 5000 GT απαιτείται να παρακολουθούν και να καταγράφουν δεδομένα σχετικά με την κατανάλωση καυσίμου σε κάθε τους ταξίδι. Έπειτα, στο τέλος κάθε ημερολογιακού έτους οι πλοιοκτήτριες εταιρείες παραδίδουν την αναφορά που περιλαμβάνει όλα τα σχετικά δεδομένα που συλλέχθηκαν στις αρμόδιες αρχές του κράτους του οποίου φέρουν τη σημαία (flag state). Οι εν λόγω αρμόδιες αρχές κρίνουν εάν τα δεδομένα αυτά έχουν καταγραφεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Κανονισμού και εν συνεχεία είναι υπεύθυνες για την καταχώρηση όλων των απαραίτητων στοιχείων στην αντίστοιχη βάση δεδομένων του IMO. Τέλος, ο IMO παράγει την ετήσια αναφορά με όλα τα δεδομένα που συλλέχθηκαν.

Είναι σαφές πως το DCS βασίζεται στην ίδια λογική παρακολούθησης και καταγραφής της κατανάλωσης καυσίμου, έχει όμως και δύο ουσιώδεις διαφορές από τον MRV. Η πρώτη διαφορά έχει να κάνει με το γεγονός πως το DCS καταγράφει μόνο την κατανάλωση καυσίμου ενώ ο MRV καταγράφει και τις εκπομπές CO<sub>2</sub>. Η άλλη σημαντική διαφορά είναι ότι στο DCS δεν προβλέπεται η δημοσίευση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν, εν αντιθέσει με τα αποτελέσματα του MRV που δημοσιεύονται μέσω της ετήσιας αναφοράς της Ευρωπαϊκής Επιτροπής.

### 3. Μέθοδοι υπολογισμού αερίων εκπομπών από τα πλοία

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η κατασκευή ενός υπολογιστικού εργαλείου για τον αναλυτικό υπολογισμό των αερίων εκπομπών από τα πλοία. Το πρώτο βήμα για την κατασκευή του εν λόγω εργαλείου είναι η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου και του αντίστοιχού μαθηματικού μοντέλου, τα οποία θα αποτελέσουν τη βάση για την ανάπτυξη του κώδικα στη γλώσσα προγραμματισμού Python. Επομένως, αυτό που χρειάζεται αρχικά είναι η αναζήτηση στη σχετική βιβλιογραφία των υφισταμένων μεθόδων υπολογισμού των αερίων εκπομπών από τα πλοία. Ύστερα λοιπόν από κατάλληλη έρευνα διαπιστώθηκε πως υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι, η Top-down και η Bottom-up ή Activity-based. Η ειδοποιός διαφορά των δύο αυτών μεθόδων είναι η εξής: στη μέθοδο Top-down υπολογίζονται οι συνολικές αέριες εκπομπές, οι οποίες εν συνεχεία αποδίδονται σε κάθε πλοίο, ενώ στη μέθοδο Bottom-up (ή Activity-based) υπολογίζονται οι αέριες εκπομπές κάθε πλοίου οι οποίες εν συνεχεία αθροίζονται για να προκύψουν οι συνολικές αέριες εκπομπές. Η μέθοδος Bottom-up σε διάφορες παραλλαγές είναι εκείνη που συναντάται σε πληθώρα σύγχρονων ερευνών, εν αντιθέσει με την Top-down για την οποία βρέθηκαν λιγότερες και παλαιότερες μελέτες. Η ανάλυση όλων αυτών των τρόπων υπολογισμού των αερίων εκπομπών από τα πλοία αποτελούν το αντικείμενο του παρόντος κεφαλαίου.

#### 3.1 Μέθοδος Top-down

Σύμφωνα με τη μέθοδο Top-down, υπολογίζονται οι συνολικές αέριες εκπομπές χρησιμοποιώντας δεδομένα από την παγκόσμια ναυτιλία, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά κάθε μεμονωμένου πλοίου. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα αυτά αποδίδονται σε κάθε πλοίο (Bilgili, Celebi 2018). Συγκεκριμένα, η εν λόγω μέθοδος αφορά στην εκτίμηση των παγκόσμιων αερίων εκπομπών, με τη χρήση στοιχείων για την παγκόσμια κατανάλωση καυσίμου και ειδικών συντελεστών, γνωστούς ως Emission Factors (EF) (Miola, Ciuffo 2011). Οι EF είναι συντελεστές που εκφράζουν πόσα kg ενός ρύπου παράγονται από την κατανάλωση ενός kg καυσίμου και εξαρτώνται από το χρησιμοποιούμενο καύσιμο και τον τύπο του κινητήρα. Οι υπολογισμοί αυτοί πραγματοποιούνται για κάθε συγκεκριμένο τύπο αέριας εκπομπής ξεχωριστά. Το μαθηματικό μοντέλο για τον υπολογισμό των αερίων εκπομπών από τα πλοία που αντιστοιχεί στη μέθοδο Top-down είναι το ακόλουθο (Corbett et al. 1999):

$$P_p = \sum_{i=1}^n [EPI \cdot (F \cdot Ai)]$$

όπου

P: ο εκάστοτε ρύπος

i: για NOx ο τύπος κινητήρα (1=αργόστροφος, 2=μεσόστροφος, 3=άλλο)

για άλλους ρύπους ο τύπος καυσίμου (1=υπόλειμμα, 2=απόσταγμα)

n: ο αριθμός κατηγοριών (3 για τύπο κινητήρα, 2 για τύπο καυσίμου)

P<sub>p</sub>: οι συνολικές εκπομπές για τον ρύπο P (kg)

EPI: ο Emission Factor με βάση τον τύπο του κινητήρα (για NOx) ή του καυσίμου (για άλλους ρύπους) (kg ανά kg καυσίμου)

F: η ετήσια κατανάλωση καυσίμου στην παγκόσμια ναυτιλία (kg)

Ai: το ποσοστό όλων των πλοίων με τύπο κινητήρα ή καυσίμου i αντίστοιχα

### 3.2 Μέθοδος Bottom-up ή Activity-based

Με βάση τη μέθοδο Bottom-up ή Activity-based, υπολογίζονται οι αέριες εκπομπές ενός μεμονωμένου πλοίου για μία συγκεκριμένη διανυόμενη απόσταση. Εν συνεχεία, εφαρμόζοντας αυτή τη μέθοδο σε πολλά πλοία και αθροίζοντας τα αποτελέσματα επιτυγχάνεται ο υπολογισμός των συνολικών αερίων εκπομπών (Miola, Ciuffo 2011). Συγκεκριμένα, η εν λόγω μέθοδος αφορά στην εκτίμηση των αερίων εκπομπών ενός πλοίου, λαμβάνοντας υπόψη ορισμένα βασικά του χαρακτηριστικά όπως η ισχύς του κινητήρα, η ταχύτητα του πλοίου και η συνολική ώρα που ξοδεύει το πλοίο στη θάλασσα. Επιπλέον, όμοια με τη μέθοδο Top-down, χρησιμοποιούνται ειδικοί συντελεστές (Emission Factors ,EF) που εκφράζουν την ποσότητα των ρύπων ανά ποσότητα χρησιμοποιούμενου καυσίμου. Οι υπολογισμοί αυτοί πραγματοποιούνται για κάθε τύπο αέριας εκπομπής ξεχωριστά. Το μαθηματικό μοντέλο για τον υπολογισμό των αερίων εκπομπών από τη λειτουργία των πλοίων που αντιστοιχεί στη μέθοδο Bottom-up είναι το ακόλουθο (Nunes, Alvim-Ferraz, Martins & Sousa 2017):

$$E = T \cdot [ME \cdot LF_{ME} \cdot EF_1 + AE \cdot LF_{AE} \cdot EF_2]$$

όπου

E: οι αέριες εκπομπές [kg]

T: ο χρόνος που ξοδεύει το πλοίο στη θάλασσα [h]

ME: η μέγιστη συνεχής ισχύς της κύριας μηχανής [kW]

LF<sub>ME</sub>: ο Load Factor για την κύρια μηχανή

EF<sub>1</sub>: ο Emission Factor για την κύρια μηχανή [kg/kWh]

AE: η μέγιστη συνεχής ισχύς της βοηθητικής μηχανής [kW]

LF<sub>AE</sub>: ο Load Factor για τη βοηθητική μηχανή

EF<sub>2</sub>: ο Emission Factor για τη βοηθητική μηχανή [kg/kWh]

Στην περίπτωση που δεν είναι γνωστός ο χρόνος που ξοδεύει το πλοίο στη θάλασσα αλλά είναι γνωστή η συνολική απόσταση που διανύει καθώς και η ταχύτητά του, το ανωτέρω μαθηματικό μοντέλο συναντάται και στην εξής μορφή (Moreno-Gutierrez et al., 2018):

$$E = D/v \cdot [ME \cdot LF_{ME} \cdot EF_1 + AE \cdot LF_{AE} \cdot EF_2]$$

όπου

D: η απόσταση που διανύει το πλοίο [nm]

v: η ταχύτητα του πλοίου [kn]

Τέλος, σε ορισμένες μελέτες που εξετάζονται οι αέριες εκπομπές που παράγονται από διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου (cruising, manoeuvring, hotelling), το μαθηματικό μοντέλο έχει την ακόλουθη μορφή:

$$E = \sum_p [Tr \cdot [ME \cdot LF_{ME} \cdot EF_{1,p} + AE \cdot LF_{AE} \cdot EF_{2,p}]]$$

όπου

p: η κατάσταση λειτουργίας του πλοίου

Tr: χρονική δραστηριότητα πλοίου στην κατάσταση λειτουργίας p [h]

Η ισχύς της κύριας μηχανής (ME), η ισχύς της βοηθητικής μηχανής (AE), ο χρόνος στη θάλασσα (T), η απόσταση (D) και η ταχύτητα (v) λαμβάνονται ως δεδομένα για ένα πλοίο. Επιπλέον, οι Emission Factors (EF) λαμβάνονται από δημοσιευμένους πίνακες με βάση το χρησιμοποιούμενο καύσιμο και τον τύπο του κινητήρα (IMO, 2014).

Ο συντελεστής Load Factor (LF) που εμφανίζεται στο μαθηματικό μοντέλο, ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής ισχύος του κινητήρα κατά τον υπολογισμό προς την ονομαστική ισχύ του κινητήρα. Με βάση τους διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού της πραγματικής ισχύος του κινητήρα και άρα του LF, διαμορφώνονται οι αντίστοιχες παραλλαγές της μεθόδου Bottom-up ή Activity-based (Moreno-Gutierrez et al., 2018). Οι παραλλαγές αυτές παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

### 3.2.1 Μέθοδος EPA (Environmental Protection Agency, USA)

$$P_{tr} = P_1 \cdot \left(\frac{v_{tr}}{v_1}\right)^3$$

όπου

$P_{tr}$ : η πραγματική ισχύς του κινητήρα κατά τον υπολογισμό

$P_1$ : η ονομαστική ισχύς του κινητήρα

$v_{tr}$ : η πραγματική ταχύτητα του πλοίου κατά τον υπολογισμό

$v_1$ : η ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου

### 3.2.2 Μέθοδος MAN

$$P_{tr} = P_1 \cdot \left(\frac{v_{tr}}{v_1}\right)^n$$

όπου το n εξαρτάται από τον τύπο του πλοίου και συγκεκριμένα:

Για πλοία τύπου Bulk Carrier και Tanker → n=3,2

Για πλοία τύπου Container → n=4

Για πλοία τύπου Ro-Ro → n=3,5

### 3.2.3 Μέθοδος IMO

$$P_{tr} = P_1 \cdot \frac{\left(\frac{t_{tr}}{t_1}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{v_{tr}}{v_1}\right)^3}{n_w \cdot n_f}$$

όπου

$P_{tr}$ : η πραγματική ισχύς του κινητήρα κατά τον υπολογισμό  
 $t_{tr}$ : το πραγματικό βύθισμα του πλοίου κατά τον υπολογισμό  
 $t_1$ : το βύθισμα σχεδίασης του πλοίου  
 $v_{tr}$ : η πραγματική ταχύτητα του πλοίου κατά τον υπολογισμό  
 $v_1$ : η ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου  
 $n_w$ : συντελεστής επίδρασης του καιρού στην πρόωση  
 $n_f$ : συντελεστής επίδρασης της ρύπανσης της γάστρας στην πρόωση

Επιπροσθέτως, σε αυτή την εκδοχή της μεθόδου προτείνεται και ο υπολογισμός της πραγματικής ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (SFOC) ως εξής:

$$SFOC = SFOC_{relative} \cdot SFOC_{base}$$

όπου

$$SFOC_{relative} = 0,455 \cdot LF^2 - 0,71 \cdot LF + 1,28$$

$SFOC_{base}$ : σταθερά που λαμβάνεται από το project guide του κινητήρα

### 3.2.4 Μέθοδος Jalkanen

$$P_{tr} = \epsilon_p \cdot P_{installed} \cdot \left(\frac{v_{tr}}{v_1 + v_{safety}}\right)^3$$

όπου

$P_{tr}$ : η πραγματική ισχύς του κινητήρα κατά τον υπολογισμό  
 $\epsilon_p = 0,8$   
 $P_{installed}$ : η συνολική εγκατεστημένη ισχύς της κύριας μηχανής  
 $v_{tr}$ : η πραγματική ταχύτητα του πλοίου  
 $v_{design}$ : η ταχύτητα σχεδίασης  
 $v_{safety}$ : ταχύτητα ασφαλείας (ένα όριο ταχύτητας)

Και σε αυτή τη εκδοχή της μεθόδου προτείνεται ο υπολογισμός της πραγματικής ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (SFOC) με τον ίδιο τρόπο που περιγράφεται στη μέθοδο IMO.

### 3.3 Συγκριτική ανάλυση μεθόδων

Στο σημείο αυτό γίνεται η απαραίτητη συγκριτική ανάλυση των μεθόδων υπολογισμού των αερίων εκπομπών από τα πλοία που παρουσιάστηκαν, με σκοπό την επιλογή εκείνης που θα αποτελέσει τη βάση για την κατασκευή του υπολογιστικού εργαλείου. Αρχικά, πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των δύο βασικών μεθόδων, της Top-down και της Bottom-up. Η μέθοδος Top-down απαιτεί δεδομένα από την παγκόσμια ναυτιλία και τα αποτελέσματα που παράγει διαμορφώνουν μία συνολική εικόνα των αερίων εκπομπών σε παγκόσμιο επίπεδο. Αντιθέτως, η μέθοδος Bottom-up απαιτεί ως δεδομένα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ενός μεμονωμένου πλοίου, οδηγώντας σε πιο ακριβή αποτελέσματα για κάθε ένα πλοίο για το οποίο εφαρμόζεται η μέθοδος. Επομένως, η Bottom-up είναι μία μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά τόσο για τη μελέτη ενός μεμονωμένου πλοίου όσο και για τη μελέτη ενός στόλου ή μιας ολόκληρης γεωγραφικής περιοχής, αθροίζοντας τα αποτελέσματα για τις αέριες εκπομπές κάθε πλοίου. Γενικά, η μέθοδος Bottom-up θεωρείται πως οδηγεί σε πιο ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα από την Top-down (Nunes et al., 2017), λόγω των πιο λεπτομερών και εξειδικευμένων δεδομένων που λαμβάνει υπόψη για κάθε πλοίο. Αυτό βέβαια καθιστά πολύ σημαντική τη δυνατότητα πρόσβασης σε αντίστοιχες βάσεις δεδομένων για τη συλλογή των απαιτούμενων στοιχείων. Επιπροσθέτως, η μέθοδος Top-down συναντάται πλέον σε λίγες και κυρίως παλαιότερες μελέτες, εν αντιθέσει με την Bottom-up που χρησιμοποιείται σε πληθώρα σύγχρονων ερευνών. Τέλος, η μέθοδος Bottom-up είναι εκείνη που προτιμάται και από τον IMO (IMO, 2014), γεγονός που εγγυάται την καθολική αποδοχή της χρήσης και των αποτελεσμάτων της μεθόδου αυτής. Συνοπτικά η σύγκριση των δύο βασικών μεθόδων υπολογισμού των αερίων εκπομπών από τα πλοία παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα:

**Πίνακας 3: Συγκριτική ανάλυση μεθόδων Top-down και Bottom-up ή Activity-based**

	<b>Μέθοδος Top-down</b>	<b>Μέθοδος Bottom-up ή Activity-based</b>
Απαιτούμενα δεδομένα	Emission Factor, Παγκόσμια κατανάλωση καυσίμου	Emission Factor, Load Factor, Ισχύς κινητήρα, Χρόνος στη θάλασσα ή διανυόμενη απόσταση, Ταχύτητα πλοίου
Αποτελέσματα	Συνολικές παραγόμενες αέριες εκπομπές σε παγκόσμιο επίπεδο	Συνολικές αέριες εκπομπές ανά πλοίο
Εφαρμογή	Σε λίγες και κυρίως παλαιότερες μελέτες	Σε πληθώρα πρόσφατων ερευνών, προτείνεται και από τον IMO

Με βάση την ανωτέρω συγκριτική ανάλυση, για το υπολογιστικό εργαλείο επιλέγεται η μέθοδος Bottom-up ή Activity-based.

Το τελευταίο βήμα για τον καθορισμό του μαθηματικού μοντέλου στο οποίο θα βασιστεί ο κώδικας στη γλώσσα προγραμματισμού Python για την κατασκευή του υπολογιστικού εργαλείου, είναι η επιλογή μίας εκ των παραλλαγών της μεθόδου Bottom-up ή Activity-based που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Συγκρίνοντας τις εν λόγω εκδοχές τις μεθόδους, διαπιστώνεται πως εκείνη που ακολουθεί ο IMO λαμβάνει υπόψη πιο λεπτομερή και εξειδικευμένα στοιχεία για κάθε πλοίο από τις υπόλοιπες. Για παράδειγμα, η εκδοχή του IMO είναι η μόνη που για τον υπολογισμό των αερίων εκπομπών λαμβάνει υπόψη την επίδραση του καιρού και την επίδραση της ρύπανσης της γάστρας στην πρόωση του πλοίου. Το γεγονός αυτό σημαίνει πως η μέθοδος αυτή οδηγεί σε πιο ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα. Επιπλέον, το γεγονός ότι προτείνεται από τον IMO προσδίδει το ανάλογο κύρος και, όπως ειπώθηκε, εγγυάται σε μεγάλο βαθμό την αποδοχή της χρήσης και των αποτελεσμάτων της. Για τον λόγο αυτό η εκδοχή του IMO φαίνεται πως είναι η πιο κατάλληλη μέθοδος για το υπολογιστικό εργαλείο. Από την άλλη μεριά, η MAN προτείνει η σχέση μεταξύ της ισχύος του κινητήρα και της ταχύτητας του πλοίου να μην θεωρείται κυβική για όλους τους τύπους των πλοίων, όπως θεωρείται στη μέθοδο του IMO. Όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενη παράγραφο, η MAN προτείνει διαφορετικό συντελεστή για τη σχέση αυτή ανάλογα με τον τύπο του πλοίου. Αυτό αποτελεί μία παράμετρο που ενδεχομένως οδηγεί σε πιο ακριβή αποτελέσματα για κάθε συγκεκριμένο τύπο πλοίου. Για τον λόγο αυτό μία πολύ ενδιαφέρουσα δημοσίευση στη σχετική βιβλιογραφία προτείνει την χρήση της μεθόδου του IMO, λαμβάνοντας όμως για τη σχέση ισχύος - ταχύτητας τους συντελεστές που προτείνει η MAN (Moreno-Gutierrez et al. 2018). Η εν λόγω συνδυαστική μέθοδος είναι και εκείνη που επιλέγεται τελικά για την κατασκευή του υπολογιστικού εργαλείου στην παρούσα εργασία.



## 4. Αναλυτική περιγραφή του υπολογιστικού εργαλείου

Ύστερα από την παρουσίαση των πιο διαδεδομένων μεθοδολογιών για τον υπολογισμό των αερίων εκπομπών από τα πλοία, ακολούθησε η συγκριτική τους ανάλυση σε θεωρητικό επίπεδο και εν τέλει η επιλογή εκείνης της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία. Με βάση λοιπόν την επιλεχθείσα μεθοδολογία, αναπτύχθηκε κώδικας στη γλώσσα προγραμματισμού Python, δημιουργώντας έτσι ένα εργαλείο που υπολογίζει τις αέριες εκπομπές από τα πλοία. Η βασική του λογική είναι ότι «διαβάζει» ένα αρχείο με ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά ενός αριθμού πλοίων και υπολογίζει τις αέριες εκπομπές που παράγονται από αυτά σε κατάσταση πλεύσης στην ανοικτή θάλασσα. Συγκεκριμένα, το εν λόγω υπολογιστικό εργαλείο παρουσιάζει κατάλληλα διαμορφωμένους πίνακες με τα αποτελέσματα και επιπλέον παρέχει ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών ανά τύπο πλοίου, ανά τύπο αέριας εκπομπής αλλά και με βάση την ταχύτητα και την ηλικία των πλοίων. Με λίγα λόγια, πέρα από την καθαρή ποσότητα αερίων εκπομπών από τα πλοία που εξετάζονται, το εργαλείο πληροφορεί τον χρήστη σχετικά με το ποιος τύπος πλοίου παράγει τις περισσότερες εκπομπές, δηλαδή ποιος τύπος πλοίου επιβαρύνει περισσότερο το περιβάλλον, αλλά και ποιος συγκεκριμένος τύπος αέριας εκπομπής παράγεται περισσότερο. Επιπροσθέτως, πραγματοποιείται ανάλυση με βάση την ηλικία και την ταχύτητα των πλοίων. Οι αναλύσεις αυτές παρουσιάζονται τόσο με αναλυτικούς πίνακες όσο και με κατάλληλα διαμορφωμένα διαγράμματα, καθώς η οπτικοποίηση των δεδομένων συμβάλλει πάντοτε στην καλύτερη κατανόησή τους. Τέλος, δημιουργείται ένα αρχείο excel με τις αναλυτικές αέριες εκπομπές κάθε πλοίου ξεχωριστά, έτσι ώστε ο χρήστης να γνωρίζει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα κάθε μεμονωμένου πλοίου. Σημειώνεται πως τα αποτελέσματα που παράγει το υπολογιστικό εργαλείο αφορούν τις κυριότερες εκπομπές που παράγονται και απασχολούν τη ναυτιλία (IMO, 2014) και συγκεκριμένα το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), τα οξείδια του θείου (SO<sub>x</sub>), τα οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και τα αιωρούμενα σωματίδια (PM). Επιπροσθέτως, το εργαλείο αφορά τέσσερις βασικούς τύπους πλοίων και συγκεκριμένα τους τύπους Bulk Carrier, Tanker, Container και Ro-Ro. Η λεπτομερής ανάλυση των χαρακτηριστικών της μεθοδολογίας και του αντίστοιχου μαθηματικού μοντέλου στο οποίο βασίστηκε η κατασκευή του υπολογιστικού εργαλείου και η αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας του εργαλείου αποτελούν το θέμα του παρόντος κεφαλαίου.

### 4.1 Χαρακτηριστικά της μεθοδολογίας που επιλέχθηκε

Η μεθοδολογία στην οποία βασίστηκε η κατασκευή του υπολογιστικού εργαλείου είναι η Bottom-up ή Activity-based. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε η εκδοχή της που προτείνεται από τον IMO (IMO, 2014) με μία μικρή διαφοροποίηση που προτείνεται σε μία ενδιαφέρουσα μελέτη στη σχετική βιβλιογραφία (Moreno-Gutierrez, Rajaro-Velazquez et al., 2018). Η διαφοροποίηση αυτή αφορά τη σχέση ισχύος κινητήρα - ταχύτητας πλοίου, η οποία δεν θεωρείται κυβική όπως στην εκδοχή του IMO αλλά εξαρτάται από τον τύπο του πλοίου όπως προτείνει η εταιρεία MAN.

#### 4.1.1 Μαθηματικό μοντέλο

Το αντίστοιχο μαθηματικό μοντέλο για τον υπολογισμό των αερίων εκπομπών από τα πλοία, σύμφωνα με την εν λόγω μεθοδολογία είναι το ακόλουθο:

$$E = T \cdot [ ME \cdot LF_{ME} \cdot EF_1 + AE \cdot LF_{AE} \cdot EF_2 ]$$

Όπου

E: οι αέριες εκπομπές [kg]

T: ο συνολικός χρόνος του πλοίου στη θάλασσα [h]

ME: η μέγιστη συνεχής ισχύς της κύριας μηχανής [kW]

LF<sub>ME</sub>: ο Load Factor για την κύρια μηχανή

EF<sub>1</sub>: ο Emission Factor για την κύρια μηχανή [kg/kWh]

AE: η μέγιστη συνεχής ισχύς της βοηθητικής μηχανής [kW]

LF<sub>AE</sub>: ο Load Factor για τη βοηθητική μηχανή

EF<sub>2</sub>: ο Emission Factor για τη βοηθητική μηχανή [kg/kWh]

Όμως, στην παρούσα εργασία λαμβάνεται υπόψη η επίδραση μόνο της κύριας μηχανής του πλοίου και συνεπώς το ανωτέρω μαθηματικό μοντέλο απλοποιείται ως ακολούθως:

$$E = T \cdot [ ME \cdot LF \cdot EF ]$$

Οι επιμέρους παράμετροι του μαθηματικού μοντέλου, δηλαδή τα χαρακτηριστικά της μεθοδολογίας που επιλέχθηκε, αναλύονται στις επόμενες παραγράφους του παρόντος κεφαλαίου.

#### 4.1.2 Load Factor (LF)

Θα μπορούσε να ειπωθεί πως ο Load Factor (LF) αποτελεί την πιο σημαντική παράμετρο σε όλη τη διαδικασία υπολογισμού των αερίων εκπομπών από τα πλοία. Αυτό φαίνεται και από το γεγονός πως οι διαφορετικές εκδοχές της μεθόδου Bottom-up που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, ουσιαστικά διαφοροποιούνται μόνο ως προς τον τρόπο υπολογισμού του LF. Ως προς το φυσικό του νόημα, ο LF εκφράζει τον λόγο της πραγματικής ισχύος που παράγει ο κινητήρας του πλοίου προς την ονομαστική του ισχύ. Δηλαδή, ο LF ορίζεται ως:

$$LF = \frac{P_{real}}{P_{nom}}$$

όπου

P<sub>real</sub>: η πραγματική ισχύς που παράγει ο κινητήρας

P<sub>nom</sub>: η ονομαστική ισχύς του κινητήρα

Γίνεται λοιπόν σαφές πως το κύριο ζητούμενο είναι ο κατά το δυνατόν πιο ακριβής προσδιορισμός της πραγματικής ισχύος της κύριας μηχανής του πλοίου, ενώ αυτό πλέει στην ανοικτή θάλασσα. Από φυσικής σκοπιάς, αυτό επιβεβαιώνεται εάν αναλογιστεί κάποιος πως το μέγεθος της πραγματικής ισχύος του κινητήρα είναι αυτό που καθορίζει την ποσότητα του καυσίμου που χρειάζεται να καταναλωθεί και κατά συνέπεια την ποσότητα των αερίων εκπομπών που θα παραχθούν από το πλοίο.

Από ποιους παράγοντες εξαρτάται η πραγματική ισχύς του κινητήρα; Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα αποτελεί τον οδηγό για την εύρεση ενός μαθηματικού μοντέλου για τον υπολογισμό του LF. Είναι γνωστό πως η ισχύς παράγεται από τον κινητήρα προκειμένου το πλοίο να υπερνικήσει την αντίσταση που αντιμετωπίζει κατά την πλεύση του στο νερό (Πολίτης, 2011). Η αντίσταση του πλοίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα που αναπτύσσει. Είναι προφανές πως για να μπορέσει ένα πλοίο να κινηθεί με μεγαλύτερη ταχύτητα απαιτείται και μεγαλύτερη ισχύ από τον κινητήρα. Επιπροσθέτως, η αντίσταση του πλοίου εξαρτάται από το βύθισμά του. Κατά κανόνα, αύξηση του βυθίσματος του πλοίου συνεπάγεται μεγαλύτερη βρεχόμενη επιφάνεια και άρα μεγαλύτερη αντίσταση (IMO, 2014). Εάν το πλοίο έπλεε σε ιδανικές συνθήκες, δηλαδή σε ήρεμο νερό και με καθαρή γάστρα, οι παράγοντες που αναφέρθηκαν θα ήταν αρκετοί για τον προσδιορισμό της πραγματικής ισχύος του κινητήρα και άρα του LF. Όμως, στην πραγματικότητα το πλοίο καλείται να κινηθεί σε νερό με ανεμογενείς κυματισμούς που εξαρτώνται από τον καιρό και αυξάνουν την αντίσταση (Αθανασούλης, Μπελιμπασάκης, 2012). Επιπλέον, με το πέρασμα του χρόνου προκαλείται ρύπανση της γάστρας του πλοίου τροποποιώντας την επιφάνεια της και αυξάνοντας την αντίσταση του πλοίου (Πολίτης, 2011). Το μαθηματικό μοντέλο που λαμβάνει υπόψη όλα τα ανωτέρω για τον υπολογισμό του LF είναι το ακόλουθο (IMO, 2014):

$$LF = \frac{\left(\frac{t_{tr}}{t_1}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{v_{tr}}{v_1}\right)^n}{n_w \cdot n_f}$$

όπου

$t_{tr}$ : πραγματικό βύθισμα κατά τον υπολογισμό

$t_1$ : βύθισμα σχεδίασης

$v_{tr}$ : πραγματική ταχύτητα του πλοίου κατά τον υπολογισμό

$v_1$ : ταχύτητα υπηρεσίας

$n_w$ : συντελεστής επίδρασης του καιρού στην πρόωση (weather factor)

$n_f$ : συντελεστής επίδρασης της ρύπανσης της γάστρας στην πρόωση (fouling factor)

$n$ : σχέση ισχύος κινητήρα - ταχύτητας πλοίου

Για το φυσικό νόημα και τις τιμές που λαμβάνουν οι συντελεστές  $n_w, n_f$  που συμμετέχουν στην ανωτέρω σχέση θα γίνει αναλυτικότερη αναφορά στις επόμενες παραγράφους.

### 4.1.3 Emission Factor (EF)

Μία ακόμα σημαντική παράμετρος που λαμβάνεται υπόψη κατά τον υπολογισμό των αερίων εκπομπών από τα πλοία είναι ο λεγόμενος Emission Factor (EF). Ο EF είναι διαφορετικός για κάθε τύπο αέριας εκπομπής και εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του κινητήρα και τον τύπο του καυσίμου που χρησιμοποιείται. Συγκεκριμένα, εξαρτάται από το αν εξετάζεται η κύρια ή η βοηθητική μηχανή του πλοίου και αν αυτή χαρακτηρίζεται ως βραδύστροφη, μεσόστροφη ή ταχύστροφη. Επιπλέον, τα συνήθη χρησιμοποιούμενα καύσιμα στη ναυτιλία είναι τα Heavy Fuel Oil (HFO), Marine Diesel Oil (MDO), Marine Gas Oil (MGO) και λιγότερο το Liquefied Natural Gas (LNG) (IMO, 2014).

Ο EF συναντάται σε δύο μορφές. Στην πρώτη εκφράζεται σε γραμμάρια ρύπου ανά γραμμάρια καυσίμου [g pollutant / g fuel]. Η δεύτερη μορφή, η οποία χρησιμοποιείται και στο μαθηματικό μοντέλο για τον υπολογισμό των αερίων εκπομπών όπως ορίστηκε στην παράγραφο 4.2.1, προκύπτει πολλαπλασιάζοντας τον EF της πρώτης μορφής με την ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC). Έτσι, λαμβάνεται ο EF που εκφράζεται σε γραμμάρια ρύπου ανά κιλοβατώρα [g / kWh].

Στη διεθνή βιβλιογραφία επικρατεί μία συζήτηση σχετικά με τις τιμές του Emission Factor, με τις περισσότερες μελέτες τελικά να χρησιμοποιούν πίνακες με τιμές του EF από άλλες δημοσιευμένες μελέτες (Nunes, Alvim-Ferraz et al., 2017). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται οι πίνακες για τις τιμές του EF της κύριας μηχανής του πλοίου που έχει δημοσιεύσει ο IMO (IMO, 2014). Οι εν λόγω πίνακες είναι οι ακόλουθοι:

Πίνακας 4: Emission Factors για CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, PM

Fuel	EF <sub>baseline</sub> CO <sub>2</sub> [g pollutant/g fuel]	EF <sub>baseline</sub> SO <sub>x</sub> [g pollutant/g fuel]	EF <sub>baseline</sub> PM [g pollutant/g fuel]
HFO	3.114	0.053	0.00728
MDO/MGO	3.206	0.00264	0.00097
LNG	2.750	0.00002	0.00018

Σημειώνεται πως με EF<sub>baseline</sub> συμβολίζεται ο Emission Factor με μονάδες μέτρησης [g pollutant / g fuel] και με EF ο τελικός Emission Factor με μονάδες μέτρησης [g / kWh].

Πίνακας 5: Emission Factors για NO<sub>x</sub>

Engine Type	Fuel Type	EF <sub>baseline</sub> NO <sub>x</sub> [g pollutant/g fuel]
Tier 0 SSD	HFO	0.09282
	MDO	0.08725
	LNG	0.00783
Tier 1 SSD	HFO	0.08718
	MDO	0.08195
	LNG	0.00783
Tier 2 SSD	HFO	0.07746
	MDO	0.07375
	LNG	0.00783
Tier 0 MSD	HFO	0.06512
	MDO	0.06121
	LNG	0.00783
Tier 1 MSD	HFO	0.06047
	MDO	0.05684
	LNG	0.00783
Tier 2 MSD	HFO	0.05209
	MDO	0.04896
	LNG	0.00783

Παρατηρείται πως όλες οι τιμές των EF στους ανωτέρω πίνακες εκφράζονται σε γραμμάρια ρύπου ανά γραμμάρια καυσίμου (g pollutant/g fuel). Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι τιμές αυτές πολλαπλασιάζονται με την ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC), έτσι ώστε οι EF να εκφραστούν σε γραμμάρια ρύπου ανά κιλοβατώρα (g/kWh). Δηλαδή, οι τελικές τιμές των EF που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των αερίων εκπομπών προκύπτουν ως εξής:

$$EF = EF_{\text{baseline}} \cdot SFOC_{\text{real}}$$

#### 4.1.4 Ειδική κατανάλωση καυσίμου (Specific Fuel Oil Consumption, SFOC)

Με βάση τη συγκεκριμένη εκδοχή της μεθόδου Bottom-up που έχει επιλεγεί (IMO, 2014), η αρχική τιμή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, που λαμβάνεται από ειδικούς πίνακες όπως θα δειχθεί παρακάτω, και συμβολίζεται με SFOC<sub>base</sub> επιδέχεται μιας κατάλληλης διόρθωσης έτσι ώστε να προκύψει η πραγματική ειδική κατανάλωση καυσίμου που συμβολίζεται με SFOC<sub>real</sub>. Σύμφωνα λοιπόν με αυτή τη διόρθωση, ισχύει:

$$SFOC_{\text{real}} = (0,455 \cdot LF^2 - 0,71 \cdot LF + 1,28) \cdot SFOC_{\text{base}}$$

#### 4.1.5 Συντελεστής επίδρασης καιρού (Weather Factor, $n_w$ )

Ο σκοπός του λεγόμενου weather factor ( $n_w$ ) είναι να ποσοτικοποιήσει την επίδραση του ανέμου και των κυματισμών στην αύξηση της αντίστασης του πλοίου και κατ' επέκταση στην αύξηση της απαιτούμενης ισχύος από τον κινητήρα. Οι τιμές της συγκεκριμένης παραμέτρου λαμβάνονται με βάση τα ακόλουθα κριτήρια (IMO, 2014):

- Θεωρείται αύξηση 10% στην απαιτούμενη ισχύ για πλοία σε απόσταση μικρότερη από 5 ναυτικά μίλια από την πλησιέστερη στεριά. Σε αυτή την περίπτωση λοιπόν ισχύει:

$$n_w = \frac{1}{1,10}$$

- Θεωρείται αύξηση 15% στην απαιτούμενη ισχύ για πλοίο που πλέει σε απόσταση μεγαλύτερη από 5 ναυτικά μίλια από την πλησιέστερη στεριά. Σε αυτή την περίπτωση λοιπόν ισχύει:

$$n_w = \frac{1}{1,15}$$

Ο διαχωρισμός αυτός υφίσταται καθώς όταν ένα πλοίο κινείται κοντά σε κάποια ακτή αναμένεται να συναντήσει λιγότερο ακραίες καιρικές συνθήκες.

Επομένως, από τη στιγμή που αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η παραγωγή αερίων εκπομπών από τα πλοία κατά την πλεύση τους στην ανοικτή θάλασσα, άρα σε απόσταση μεγαλύτερη από 5 ναυτικά μίλια από την πλησιέστερη στεριά, η παράμετρος  $n_w$  λαμβάνει σταθερή τιμή και συγκεκριμένα:

$$n_w = \frac{1}{1,15}$$

#### 4.1.6 Συντελεστής επίδρασης ρύπανσης της γάστρας (Fouling Factor, $n_f$ )

Γενικά οι επιφάνειες των πλοίων εμφανίζουν σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό τραχύτητα, η οποία εξαρτάται κυρίως από τον τρόπο κατασκευής και το είδος της βαφής που έχει χρησιμοποιηθεί. Επιπλέον, με την πάροδο του χρόνου η βρεχόμενη επιφάνεια του πλοίου αρχίζει να εμφανίζει ακόμα μεγαλύτερη τραχύτητα λόγω ρύπανσης. Η τραχύτητα αυτή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης του πλοίου και κατά συνέπεια την αυξημένη ζήτηση ισχύος από την κύρια μηχανή του πλοίου (Πολίτης, 2011). Σκοπός του λεγόμενου fouling factor ( $n_f$ ) είναι να ποσοτικοποιήσει την επίδραση της ρύπανσης της γάστρας στην αύξηση της απαιτούμενης ισχύος έτσι ώστε να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς των παραγόμενων αερίων εκπομπών. Η σχέση υπολογισμού της παραμέτρου αυτής είναι η ακόλουθη (ICCT, 2017):

$$n_f = 1,02 + [0,044\{(\frac{k2}{L_{BP}})^{1/3} - (\frac{k1}{L_{BP}})^{1/3}\}] / (0,018 \cdot L_{BP}^{-1/3})$$

όπου

$L_{BP}$ : μήκος μεταξύ καθέτων

k1: αρχική τραχύτητα γάστρας ενός νέου πλοίου, ίση με 120  $\mu\text{m}$

k2: η τελική τραχύτητα της γάστρας σύμφωνα με τον ακόλουθο πίνακα

Πίνακας 6: Τραχύτητα γάστρας συναρτήσει της ηλικίας του πλοίου

Age of ship	AHR (Average Hull Roughness)
0-1 year	120 $\mu\text{m}$
2-5 years	150 $\mu\text{m}$
6-10 years	200 $\mu\text{m}$
11-15 years	300 $\mu\text{m}$
16-20 years	400 $\mu\text{m}$
> 20 years	500 $\mu\text{m}$

Σημειώνεται πως η ανωτέρω σχέση υπολογισμού του fouling factor δεν λαμβάνει υπόψη τον δεξαμενισμό των πλοίων, όπου κατά κανόνα πραγματοποιείται κάθε πέντε χρόνια. Επιπλέον, ορισμένα πλοία ενδεχομένως να προγραμματίζουν δεξαμενισμό και νέα βαφή με μεγαλύτερη συχνότητα από πέντε χρόνια. Επιπροσθέτως, λόγω της διαφορετικής βαφής που επιλέγεται σε κάθε πλοίο, στην πραγματικότητα ορισμένα πλοία εμφανίζουν αυξημένη και άλλα μειωμένη προστασία έναντι ρύπανσης. Όλα αυτά αποτελούν και τους κύριους λόγους για τους οποίους εν γένει ο προσδιορισμός της τιμής του fouling factor χαρακτηρίζεται από αβεβαιότητα (IMO, 2014).

## 4.2 Περιγραφή λειτουργίας υπολογιστικού εργαλείου

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζεται αναλυτικά η λειτουργία του υπολογιστικού εργαλείου. Αρχικά, προσδιορίζονται τα δεδομένα εισόδου και ο τρόπος που εισάγονται, έπειτα καταγράφονται οι υπολογισμοί που υλοποιεί το πρόγραμμα και τέλος περιγράφονται τα παραγόμενα αποτελέσματα, δηλαδή τα δεδομένα εξόδου που λαμβάνονται από την χρήση του υπολογιστικού εργαλείου.

### 4.2.1 Δεδομένα εισόδου (Input)

Αρχικά, το πρόγραμμα διαβάζει ένα αρχείο excel με ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά ενός ή περισσότερων πλοίων, τα οποία αποτελούν έτσι τα δεδομένα εισόδου του προγράμματος. Επομένως, το μόνο που έχει να κάνει κάποιος που θέλει να κάνει χρήση του υπολογιστικού εργαλείου, είναι να αποθηκεύσει ένα αρχείο excel με τα βασικά χαρακτηριστικά ενός αριθμού πλοίων στην ίδια τοποθεσία που είναι αποθηκευμένο και το αρχείο με το πρόγραμμα στην γλώσσα προγραμματισμού Python, που αποτελεί το υπολογιστικό εργαλείο. Εν συνεχεία, χρειάζεται απλώς να «τρέξει» το πρόγραμμα αυτό, προκειμένου να λάβει τα ζητούμενα αποτελέσματα. Η λίστα με τα χαρακτηριστικά του κάθε πλοίου που πρέπει να περιλαμβάνει το εν λόγω αρχείο excel συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 7: Δεδομένα εισόδου

Όνομα πλοίου
Τύπος πλοίου
Χωρητικότητα πλοίου (DWT ή TEU)
Βύθισμα σχεδίασης [m]
Ταχύτητα υπηρεσίας [kn]
Ισχύς κύριας μηχανής [kW]
Τύπος καυσίμου (HFO,MDO,LNG)
Στροφές κύριας μηχανής [RPM]
Συνολικός χρόνος στη θάλασσα [h]
Συνολική διανυόμενη απόσταση (nm)
Στιγμιαία ταχύτητα κατά τον υπολογισμό (πραγματική ταχύτητα) [kn]
Στιγμιαίο βύθισμα κατά τον υπολογισμό (πραγματικό βύθισμα) [m]
Μήκος $L_{BP}$ [m]
Ηλικία πλοίου

Όπως φαίνεται στον ανωτέρω πίνακα, η πλειονότητα των στοιχείων που απαιτεί το υπολογιστικό εργαλείο ως δεδομένα εισόδου είναι πολύ βασικά χαρακτηριστικά του πλοίου. Επομένως, αποτελούν πληροφορίες στις οποίες η πρόσβαση δεν είναι πολύ δύσκολη. Εντούτοις, δύο από τα στοιχεία του πίνακα, που αφορούν την πραγματική κίνηση του πλοίου, αποτελούν πιο «εξεζητημένες» πληροφορίες, οι οποίες καταγράφονται σε πραγματικό χρόνο μέσω δορυφορικού συστήματος. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι η πραγματική ταχύτητα και το πραγματικό βύθισμα του πλοίου. Αυτό σημαίνει ότι ενδέχεται να προκύψει μία έλλειψη πραγματικών δεδομένων, εάν για κάποιο λόγο δεν υπάρχει πρόσβαση σε αντίστοιχες βάσεις δεδομένων. Όπως έχει αναφερθεί, το υπολογιστικό εργαλείο έχει σχεδιαστεί ώστε να δέχεται ως δεδομένα εισόδου τις πραγματικές καταγραφές της ταχύτητας και του βυθίσματος. Όμως, το εργαλείο έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί κανονικά και στην περίπτωση που τα δεδομένα αυτά δεν είναι διαθέσιμα. Συγκεκριμένα, έχει δημιουργηθεί ένα υποστηρικτικό αρχείο excel από το οποίο το υπολογιστικό εργαλείο λαμβάνει τα στοιχεία εκείνα που για οποιοδήποτε λόγο δεν εισήχθησαν ως δεδομένα εισόδου όπως προβλεπόταν. Σημειώνεται πως το εν λόγω υποστηρικτικό αρχείο περιλαμβάνει στοιχεία και για τα υπόλοιπα δεδομένα εισόδου πέραν της πραγματικής ταχύτητας και του πραγματικού βυθίσματος, έτσι ώστε να καλύπτεται και η περίπτωση που δεν μπόρεσαν να εισαχθούν ούτε τα βασικά χαρακτηριστικά ενός πλοίου. Συγκεκριμένα, το υπολογιστικό εργαλείο προβλέπει δύο περιπτώσεις: να μην είναι διαθέσιμο κανένα από τα βασικά χαρακτηριστικά ενός πλοίου ή να μην είναι διαθέσιμη κάποια από τις δορυφορικές καταγραφές σχετικά με την κίνηση ενός πλοίου, δηλαδή η πραγματική ταχύτητα, το πραγματικό βύθισμα, ο χρόνος στη θάλασσα και η διανυόμενη απόσταση. Γίνεται κατανοητό πως υπάρχει η ανάγκη τα στοιχεία του υποστηρικτικού αρχείου να είναι αξιόπιστα και να προσεγγίζουν κατά το δυνατόν τα αντίστοιχα πραγματικά δεδομένα. Η αναζήτηση τέτοιων στοιχείων δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Όμως, για τις ανάγκες υλοποίησης μίας εκ των εφαρμογών του υπολογιστικού εργαλείου που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια, αναζητήθηκαν αξιόπιστοι τρόποι εναλλακτικού υπολογισμού της πραγματικής ταχύτητας και του πραγματικού βυθίσματος, για την συμπλήρωση των αντίστοιχων στοιχείων στο υποστηρικτικό αρχείο.



Ύστερα, λοιπόν, από κατάλληλη έρευνα στη σχετική βιβλιογραφία, εντοπίστηκαν εναλλακτικοί τρόποι υπολογισμού ή πιο σωστά προσέγγισης της πραγματικής ταχύτητας και του πραγματικού βύθισματος, ώστε να γίνει εφικτή η χρήση του υπολογιστικού εργαλείου ακόμη και σε περίπτωση έλλειψής τους. Επομένως, εάν η πραγματική ταχύτητα και το πραγματικό βύθισμα δεν εισαχθούν ως δεδομένα εισόδου, το υπολογιστικό εργαλείο λαμβάνει τις τιμές αυτές από το υποστηρικτικό αρχείο και συνεχίζει απρόσκοπτα τη λειτουργία του. Οι εναλλακτικοί αυτοί υπολογισμοί, εφόσον χρειαστούν σε μία εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου, θα αποτελούν και τις παραδοχές της εφαρμογής αυτής. Σημειώνεται πως στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται μία εφαρμογή κατά την οποία η ταχύτητα και το βύθισμα υπολογίζονται από το εργαλείο αλλά και μία εφαρμογή κατά την οποία λαμβάνονται ως δεδομένα οι πραγματικές καταγραφές της ταχύτητας και του βύθισματος από το δορυφορικό σύστημα AIS.

#### 4.2.2 Υπολογισμοί

Η πρώτη εντολή που εκτελεί το πρόγραμμα είναι φυσικά να «διαβάσει» το αρχείο excel με τα στοιχεία για κάθε πλοίο. Στη συνέχεια ακολουθείται μία επαναληπτική διαδικασία ώστε οι ίδιοι οι υπολογισμοί να πραγματοποιηθούν για όλα τα πλοία που έχουν επιλεγεί να μελετηθούν μέσω του υπολογιστικού εργαλείου. Τέλος, αφού έχουν παραχθεί όλα τα αποτελέσματα για τις αέριες εκπομπές από τα πλοία, διαμορφώνονται οι αντίστοιχοι πίνακες και τα κατάλληλα διαγράμματα για την ανάλυση των αποτελεσμάτων ανά τύπο πλοίου, ανά τύπο αέριας εκπομπής αλλά και με βάση την ταχύτητα και την ηλικία των πλοίων. Όλα αυτά τα βήματα περιγράφονται παρακάτω κατά σειρά υλοποίησης, προκειμένου ο αναγνώστης να αποκτήσει μία ξεκάθαρη εικόνα για τη διαδικασία που ακολουθεί το υπολογιστικό εργαλείο.

- Εάν κάποιο από τα δεδομένα εισόδου δεν είναι διαθέσιμο, το υπολογιστικό εργαλείο λαμβάνει τις απαραίτητες τιμές από το υποστηρικτικό αρχείο.
- Από την πληροφορία για τον τύπο του πλοίου καθορίζεται η παράμετρος  $n$  για τη σχέση ισχύος - ταχύτητας. Συγκεκριμένα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, το  $n$  μπορεί να λάβει τις ακόλουθες τιμές:

**Πίνακας 8: Παράμετρος σχέσης ισχύος - ταχύτητας**

<b>Τύπος πλοίου</b>	<b><math>n</math></b>
Bulk Carrier	3.2
Tanker	3.2
Container	4
Ro-Ro	3.5

- Από την ηλικία του πλοίου, προσδιορίζεται η τιμή του συντελεστή επίδρασης της ρύπανσης της γάστρας (Fouling Factor,  $n_f$ ), σύμφωνα με τον μαθηματικό τύπο που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.1.6 (ICCT, 2017).

- Υπολογισμός του Load Factor (LF) με τον τρόπο που αναλύθηκε στην παράγραφο 4.1.2 του παρόντος κεφαλαίου. Όπως έχει γίνει σαφές, το βήμα αυτό είναι κομβικής σημασίας καθώς είναι αυτό που ουσιαστικά προσδιορίζει την συγκεκριμένη εκδοχή της μεθοδολογίας Bottom - up που επιλέχθηκε ως η βάση για την κατασκευή του υπολογιστικού εργαλείου.
- Διόρθωση της τιμής της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (SFOC), όπως ορίζει η μεθοδολογία που επιλέχθηκε και παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.1.4. Αυτή θεωρείται και η πραγματική τιμή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.
- Από την πληροφορία για το καύσιμο που χρησιμοποιεί η κύρια μηχανή του υπό εξέταση πλοίου, πληροφορία που υπενθυμίζεται πως εισάγεται ως δεδομένο εισόδου, καθορίζεται η τιμή του Emission Factor σε μονάδες μέτρησης [g pollutant / g fuel], από τους αντίστοιχους πίνακες που έχουν ενσωματωθεί στο πρόγραμμα. Σημειώνεται πως σε κάθε διαφορετικό τύπο αέριας εκπομπής αντιστοιχεί και διαφορετική τιμή του Emission Factor.
- Πολλαπλασιάζοντας τον ανωτέρω Emission Factor με την πραγματική ειδική κατανάλωση καυσίμου ( $SFOC_{re}$ ), λαμβάνεται η τιμή του Emission Factor σε μονάδες μέτρησης [g / kWh]. Αυτή είναι και η τιμή του Emission Factor που χρησιμοποιείται στον τελικό τύπο υπολογισμού των αερίων εκπομπών.
- Με όλα τα παραπάνω, το υπολογιστικό εργαλείο είναι πλέον έτοιμο να προχωρήσει στο τελικό στάδιο της διαδικασίας και να υπολογίσει τις παραγόμενες αέριες εκπομπές από το εξεταζόμενο πλοίο. Αυτό επιτυγχάνεται με το μαθηματικό μοντέλο της μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.1.1.

Όλα τα παραπάνω βήματα βρίσκονται μέσα σε έναν επαναληπτικό βρόχο και εκτελούνται τόσες φορές όσα και τα πλοία που είναι επιθυμητό να μελετηθούν μέσω του υπολογιστικού εργαλείου. Με αυτό τον τρόπο στο τέλος λαμβάνονται οι συνολικές παραγόμενες αέριες εκπομπές από όλα τα εξεταζόμενα πλοία.

Τέλος, αφού έχουν ουσιαστικά παραχθεί όλα τα επιθυμητά αποτελέσματα για τις αέριες εκπομπές από τα πλοία, μέσω κατάλληλων εντολών στον κώδικα που αναπτύχθηκε δημιουργείται ένα αρχείο excel που περιλαμβάνει όλες τις εκπομπές, ανά τύπο αέριας εκπομπής αλλά και αθροιστικά, για κάθε ένα από τα πλοία που συμμετέχουν στην εφαρμογή. Επιπροσθέτως, διαμορφώνονται και παρουσιάζονται όλοι οι σχετικοί πίνακες και τα κατάλληλα διαγράμματα για την ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών ανά τύπο πλοίου και ανά τύπο αέριας εκπομπής. Τέλος, πραγματοποιείται αντίστοιχη ανάλυση με βάση την ηλικία και την ταχύτητα των πλοίων.

### 4.2.3 Δεδομένα εξόδου (Output)

Αφού λοιπόν το πρόγραμμα εκτελέσει όλες τις εντολές που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, προκύπτουν τα δεδομένα εξόδου (output) του προγράμματος. Τα δεδομένα εξόδου είναι τα αποτελέσματα που παραλαμβάνονται ύστερα από την χρήση του υπολογιστικού εργαλείου. Τα αποτελέσματα αυτά είναι τα ακόλουθα:

Ένα αρχείο excel με τις συνολικές αέριες εκπομπές που παράγει κάθε πλοίο ανά τύπο αέριας εκπομπής αλλά και αθροιστικά. Έτσι, ο χρήστης είναι σε θέση να γνωρίζει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα κάθε μεμονωμένου πλοίου.

Πίνακες και διαγράμματα που παρουσιάζουν τις συνολικές παραγόμενες αέριες εκπομπές ανά τύπο πλοίου, για κάθε τύπο αέριας εκπομπής αλλά και αθροιστικά. Με αυτό τον τρόπο ο χρήστης μπορεί να διαπιστώσει ποιος συγκεκριμένος τύπος πλοίου παράγει τις περισσότερες αέριες εκπομπές και επομένως ποιος τύπος πλοίου είναι αυτός που επιβαρύνει περισσότερο το περιβάλλον.

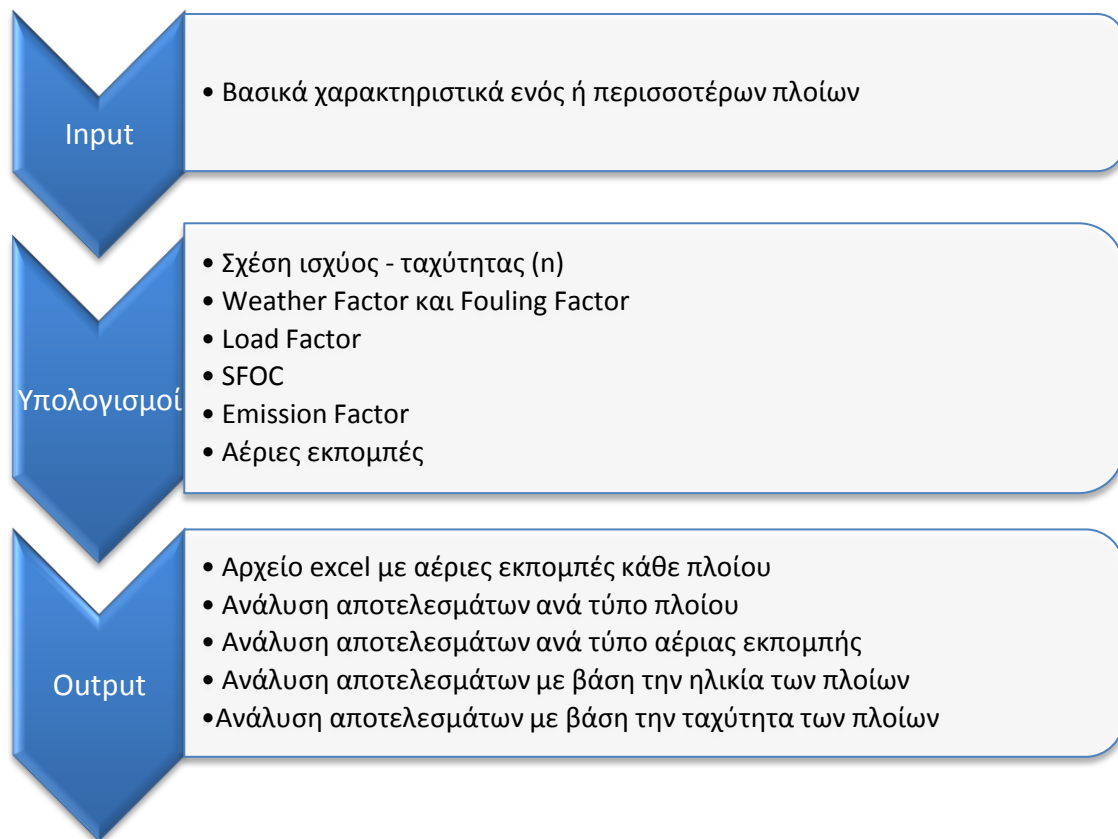
Πίνακες και διαγράμματα που παρουσιάζουν τις συνολικές παραγόμενες αέριες εκπομπές ανά τύπο αέριας εκπομπής, την αναλογία των συνολικών αερίων εκπομπών αλλά και την αναλογία των ατμοσφαιρικών ρύπων. Με αυτό τον τρόπο ο χρήστης αποκτά μία καθαρή εικόνα για το ποιος συγκεκριμένος τύπος αέριας εκπομπής παράγεται περισσότερο από όλα τα πλοία.

Διαγράμματα που αποτυπώνουν τις αέριες εκπομπές συναρτήσει της ταχύτητας των πλοίων.

Διαγράμματα που αποτυπώνουν τις αέριες εκπομπές συναρτήσει της ηλικίας των πλοίων.

Σε επόμενο κεφάλαιο περιλαμβάνεται μία πλήρης εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου, με σκοπό την παρουσίαση της ακριβούς εικόνας όλων αυτών των δεδομένων εξόδου που προκύπτουν.

Συνοπτικά, η περιγραφή της λειτουργίας του υπολογιστικού εργαλείου απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 3: Περιγραφή λειτουργίας υπολογιστικού εργαλείου

Από την ανωτέρω περιγραφή γίνεται σαφές πως το υπολογιστικό εργαλείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των αερίων εκπομπών από οποιοδήποτε αριθμό πλοίων που κινούνται σε οποιαδήποτε γεωγραφική περιοχή.

#### 4.3 Εναλλακτικοί τρόποι υπολογισμού παραμέτρων

Όπως αναφέρθηκε, αναζητήθηκαν εναλλακτικοί τρόποι υπολογισμού για δύο από τα στοιχεία που απαιτεί το υπολογιστικό εργαλείο ως δεδομένα για να μπορέσει να παράγει τα ζητούμενα αποτελέσματα. Τα στοιχεία αυτά είναι η πραγματική ταχύτητα και το πραγματικό βύθισμα κατά τον υπολογισμό, τα οποία καταγράφονται δορυφορικά και συλλέγονται ως δεδομένα σε κάθε πλοίο. Ύστερα, λοιπόν, από την απαραίτητη έρευνα στη σχετική βιβλιογραφία, εν τέλει εντοπίστηκαν οι ζητούμενοι εναλλακτικοί τρόποι υπολογισμού ή πιο σωστά προσέγγισης των δεδομένων αυτών, ώστε να γίνει εφικτή η χρήση του υπολογιστικού εργαλείου ακόμα και στην περίπτωση έλλειψής τους. Οι εν λόγω εναλλακτικοί τρόποι υπολογισμού παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο. Υπενθυμίζεται πως τα αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών περιλαμβάνονται στο υποστηρικτικό αρχείο του εργαλείου.

Επιπροσθέτως, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.1.4, η μέθοδος που επιλέχθηκε προβλέπει τη λήψη της τιμής της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου από ειδικούς πίνακες και όχι από το project guide του κινητήρα όπου αναγράφονται κανονικά. Θα μπορούσε λοιπόν να ειπωθεί πως αυτό αποτελεί έναν εναλλακτικό τρόπο υπολογισμού του SFOC και για τον λόγο αυτό θεωρήθηκε κατάλληλο να παρουσιαστεί σε αυτή την παράγραφο. Υπογραμμίζεται πως αυτός ο τρόπος υπολογισμού του SFOC έχει ενσωματωθεί στον κώδικα του υπολογιστικού εργαλείου και δεν περιλαμβάνεται στο υποστηρικτικό αρχείο, καθώς αποτελεί μία γενική παραδοχή της παρούσας εργασίας.

Όσον αφορά την ταχύτητα και το βύθισμα, επισημαίνεται ξανά πως οι εν λόγω εναλλακτικοί τρόποι υπολογισμού αυτών των δεδομένων πραγματοποιούνται μόνο σε περίπτωση που δεν εισαχθούν ως δεδομένα εισόδου οι πραγματικές τιμές.

#### 4.3.1 Ειδική κατανάλωση καυσίμου ( $SFOC_{real}$ )

Η ειδική κατανάλωση καυσίμου ( $SFOC_{base}$ ) λαμβάνει σταθερή τιμή και προκύπτει από το project guide του εκάστοτε κινητήρα. Όμως σε περιπτώσεις που ο οδηγός αυτός δεν είναι διαθέσιμος, ο IMO έχει δημοσιεύσει πίνακες με ενδεδειγμένες τιμές (IMO, 2014). Οι τιμές αυτές περιλαμβάνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 9: Τιμές SFOC κατά IMO

Rated speed	Fuel	$SFOC_{base}$ [g/kWh]
SSD	HFO	195
	MGO/MDO	185
MSD	HFO	215
	MGO/MDO	205
HSD	HFO	215
	MGO/MDO	205

Όπως φαίνεται στον πίνακα 9, η τιμή του  $SFOC_{base}$  εξαρτάται από την ταχύτητα του κινητήρα και συγκεκριμένα από το εάν ο κινητήρας χαρακτηρίζεται ως βραδύστροφος (SSD), μεσόστροφος (MSD) ή ταχύστροφος (HSD). Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τα κριτήρια διαχωρισμού των κινητήρων σε αυτές τις τρεις κατηγορίες (ICCT, 2017).

Πίνακας 10: Κατηγοριοποίηση κινητήρων με βάση τις στροφές

Στροφές κινητήρα n [RPM]	Κατηγορία
$n < 300$	SSD
$300 \leq n \leq 900$	MSD
$n > 900$	HSD

Επομένως, από την πληροφορία για τις στροφές της κύριας μηχανής του πλοίου, που εισάγεται ως δεδομένο εισόδου στο πρόγραμμα, μπορεί να υπολογιστεί η τιμή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου από τους πίνακες που έχουν ενσωματωθεί μέσω κατάλληλων εντολών στον κώδικα του προγράμματος. Παρ' όλα αυτά, εάν για κάποιον λόγο δεν είναι διαθέσιμες ούτε οι στροφές του κινητήρα ενός πλοίου, η κατάταξή του σε μία από τις τρεις κατηγορίες ταχύτητας που αναφέρθηκαν πιο πάνω μπορεί να γίνει με βάση τον τύπο του πλοίου (Κυρτάτος, 2017). Συγκεκριμένα, μεγάλα πλοία τύπου Bulk Carrier, Tanker και Container συνήθως διαθέτουν αργόστροφους κινητήρες ενώ πλοία μέσης-υψηλής ταχύτητας τύπου Ro-Ro συνήθως χρησιμοποιούν μεσόστροφους κινητήρες.

#### 4.3.2 Πραγματική ταχύτητα κατά τον υπολογισμό

Όσον αφορά την ταχύτητα, η παραδοχή που είναι αναγκαίο να γίνει σε περίπτωση έλλειψης δεδομένων, είναι ότι η τιμή της πραγματικής ταχύτητας κατά τον υπολογισμό θα ληφθεί με βάση τον τύπο του πλοίου και σύμφωνα με στοιχεία που έχει δημοσιεύσει σε μελέτη του ο IMO (IMO, 2014). Συγκεκριμένα, η τιμή της πραγματικής ταχύτητας λαμβάνεται ως συνάρτηση της ταχύτητας υπηρεσίας ως ακολούθως:

**Πίνακας 11: Μέση ταχύτητα ανά κατηγορία πλοίου προς ταχύτητα υπηρεσίας**

Ship type	Size category	Units	Average speed/service speed
Bulk Carrier	0-9999	DWT	0.84
	10000-34999		0.82
	35000-59999		0.82
	60000-99999		0.81
	100000-199999		0.84
	200000-+		0.84
Container	0-999	TEU	0.77
	1000-1999		0.73
	2000-2999		0.7
	3000-4999		0.68
	5000-7999		0.65
	8000-11999		0.65
	12000-14500		0.66
	14500-+		0.6
Oil tanker	0-4999	DWT	0.8
	5000-9999		0.75
	10000-19999		0.76
	20000-59999		0.8
	60000-79999		0.81
	80000-119999		0.78
	120000-199999		0.77
	200000-+		0.8
Ro-Ro	0-4999	DWT	0.82
	5000-+		0.76

### 4.3.3 Πραγματικό βύθισμα κατά τον υπολογισμό

Όπως και με την τιμή της πραγματικής ταχύτητας έτσι και με την τιμή του πραγματικού βυθίσματος αναζητήθηκε εναλλακτικός τρόπος για τον καθορισμό του μέσα από τη σχετική βιβλιογραφία. Στην περίπτωση αυτή όμως αξίζει να σημειωθεί πως η έρευνα ήταν ακόμα πιο δύσκολη. Τελικά, ο ζητούμενος εναλλακτικός τρόπος υπολογισμού βρέθηκε σε μία ενδιαφέρουσα δημοσίευση του ICCT (ICCT, 2017). Σύμφωνα λοιπόν με την εν λόγω μελέτη, η διαδικασία υπολογισμού του πραγματικού βυθίσματος έχει ως εξής:

Αρχικά, ορίζεται ένας παράγοντας προσαρμογής βυθίσματος (DAF, Draught Adjustment Factor), όπου:

$$DAF=(t_{tr}/t_1)^{2/3}$$

Δηλαδή, ο DAF που ορίζεται στη συγκεκριμένη έρευνα πρόκειται ουσιαστικά για την παράμετρο που αφορά το βύθισμα του πλοίου στη μαθηματική σχέση υπολογισμού του Load Factor (LF), όπως ορίστηκε στην παράγραφο 4.2.2.

Στη συνέχεια, η εν λόγω δημοσίευση περιλαμβάνει πίνακα με τιμές του DAF συναρτήσει του τύπου του πλοίου. Ο ακόλουθος πίνακας περιλαμβάνει τις τιμές αυτές για τους τύπους πλοίου που εξετάζονται στην παρούσα εργασία:

Πίνακας 12:Τιμές DAF ανά τύπο πλοίου

Τύπος πλοίου	DAF
Bulk carrier	0.8032
Oil tanker	0.8226
Container	0.8761
Ro-Ro	0.9113

Επομένως, με βάση τον τύπο υπολογισμού του DAF και τον ανωτέρω πίνακα, με μία απλή μαθηματική πράξη, καταλήγουμε στις παρακάτω τιμές για το πραγματικό βύθισμα  $t_{tr}$  των πλοίων του δείγματος, συναρτήσει του βυθίσματος σχεδίασης  $t$ :

Πίνακας 13:Μέσο βύθισμα ανά τύπο πλοίου προς βύθισμα σχεδίασης

Ship type	Average draft / design draft
Bulk carrier	0.7198
Oil tanker	0.7461
Container	0.82
Ro-Ro	0.8699

## 5. Σύγκριση αποτελεσμάτων μεθόδων με εγγραφές MRV

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάστηκαν οι τέσσερις διαφορετικές εκδοχές της μεθόδου Bottom-up ή Activity-based και έγινε η σύγκρισή τους, σε θεωρητικό επίπεδο, προκειμένου να επιλεγεί εκείνη που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του υπολογιστικού εργαλείου. Ύστερα από την ολοκλήρωση της σύνταξης του κώδικα στη γλώσσα προγραμματισμού Python για τη δημιουργία του υπολογιστικού εργαλείου, όπως περιγράφηκε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο, έχει ενδιαφέρον να γίνει η σύγκριση των μεθόδων αυτών και σε πρακτικό επίπεδο. Για τον λόγο αυτό ο κώδικας τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε να δημιουργηθεί ένα πρόγραμμα με το οποίο υπολογίζονται οι αέριες εκπομπές και με τις άλλες μεθόδους πέραν της επιλεχθείσας. Αυτό αποτελεί εν μέρει και μία πρώτη εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου, χωρίς όμως την εκτενή ανάλυση των αποτελεσμάτων που κανονικά παρέχει. Μία πλήρης εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου, με όλα τα δεδομένα εξόδου και τις αναλύσεις των αποτελεσμάτων που παράγει, παρουσιάζεται σε επόμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας. Σκοπός της συγκεκριμένης εφαρμογής που αναπτύσσεται εδώ είναι ο υπολογισμός των αερίων εκπομπών για ένα συγκεκριμένο δείγμα πλοίων με την χρήση διαφορετικών μεθόδων και η σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών. Επιπροσθέτως, προκειμένου να οριστεί και ένα μέτρο σύγκρισης, τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται με τις ετήσιες εγγραφές του MRV από την ιστοσελίδα της EMSA ([www.emsa.europa.eu](http://www.emsa.europa.eu)). Σημειώνεται πως οι εγγραφές αυτές αφορούν τις εκπομπές CO<sub>2</sub> των πλοίων σε ένα ολόκληρο έτος (εν προκειμένω το 2018), συνεπώς οι υπολογισμοί του προγράμματος γίνονται για αυτό το χρονικό διάστημα. Επομένως, πέραν της απαιτούμενης τροποποίησης του κώδικα, χρειάστηκε να αναζητηθούν πραγματικά δεδομένα από υπάρχοντα πλοία των οποίων οι αέριες εκπομπές συμπεριλαμβάνονται στις εγγραφές του MRV. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα δεδομένα της εν λόγω εφαρμογής καθώς και τα αποτελέσματά της.

### 5.1 Δεδομένα εφαρμογής

Για την υλοποίηση της εφαρμογής αναζητήθηκαν πραγματικά δεδομένα από υπάρχοντα πλοία, των οποίων οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) έχουν καταγραφεί από το σύστημα του MRV. Ύστερα λοιπόν από κατάλληλη έρευνα, επιλέχθηκε ένα δείγμα 100 πλοίων το οποίο αποτελείται από 25 πλοία τύπου Bulk Carrier, 25 πλοία τύπου Tanker, 25 πλοία τύπου Container και 25 πλοία τύπου Ro-Ro. Τα χαρακτηριστικά των πλοίων του εν λόγω δείγματος αποτελούν και τα δεδομένα εισόδου του προγράμματος, όπως αυτά ορίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Κάποια από τα χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων πλοίων ελήφθησαν από την ιστοσελίδα [marinetraffic.com](http://marinetraffic.com). Τα δεδομένα που δεν προέκυψαν από τη συγκεκριμένη ιστοσελίδα ήταν ο συνολικός χρόνος κάθε πλοίου στη θάλασσα, η συνολική διανυόμενη απόσταση κάθε πλοίου, η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC), η τιμή της πραγματικής ταχύτητας και η τιμή του πραγματικού βυθίσματος κατά τον υπολογισμό. Ο συνολικός χρόνος στη θάλασσα και η συνολική διανυόμενη απόσταση για κάθε πλοίο περιλαμβάνεται στις εγγραφές του MRV στην ιστοσελίδα της EMSA. Επιπλέον, επειδή δεν κατέστη εφικτό να βρεθούν τα βυθίσματα και οι ταχύτητες που ανέπτυξε κάθε ένα από τα πλοία του δείγματος σε ολόκληρο το έτος 2018, αυτά ελήφθησαν από το υποστηρικτικό αρχείο του υπολογιστικού εργαλείου. Όπως γίνεται κατανοητό, αυτά αποτελούν και τις δύο βασικές παραδοχές της παρούσας εργασίας για την υλοποίηση της συγκεκριμένης εφαρμογής. Συνοπτικά, οι παραδοχές που γίνονται είναι οι ακόλουθες:



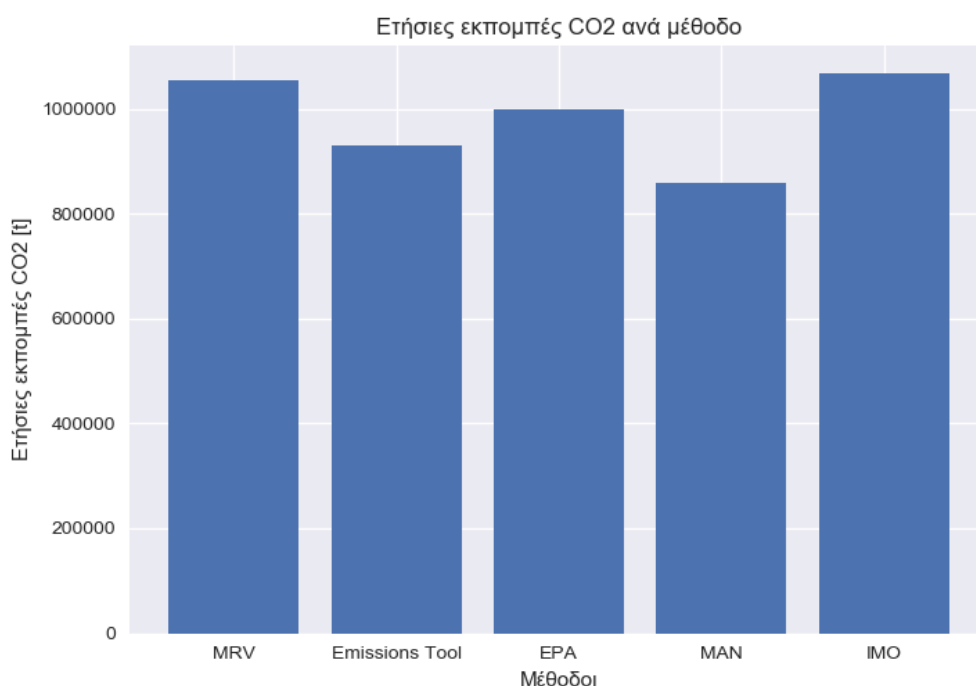
- Το υπολογιστικό εργαλείο λαμβάνει υπόψη τις αέριες εκπομπές που προέρχονται από τη λειτουργία της κύριας μηχανής του πλοίου.
- Η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) κανονικά προκύπτει από το project guide του κινητήρα. Όμως σε περιπτώσεις που ο οδηγός αυτός δεν είναι διαθέσιμος η τιμή του SFOC λαμβάνεται από πίνακες με ενδεδειγμένες τιμές που έχει δημοσιεύσει ο IMO (IMO, 2014), εφόσον είναι γνωστές οι στροφές της κύριας μηχανής και το χρησιμοποιούμενο καύσιμο. Επιπλέον, εάν δεν είναι διαθέσιμες ούτε οι στροφές του κινητήρα ενός πλοίου, γίνεται η κατάταξή του σε μία από τις τρεις κατηγορίες ταχύτητας (αργόστροφος, μεσόστροφος, ταχύστροφος) με βάση τον τύπο του πλοίου (Κυρτάτος, 2017). Αυτή η διαδικασία ακολουθήθηκε και σε αυτή την εφαρμογή καθώς δεν βρέθηκαν οι πραγματικές τιμές του SFOC για κάθε ένα από τα πλοία του δείγματος, ενώ για κάποια από αυτά δεν βρέθηκαν ούτε οι στροφές του κινητήρα.
- Η πραγματική ταχύτητα κατά τον υπολογισμό για κάθε πλοίο του δείγματος λαμβάνεται προσεγγιστικά με βάση τον τύπο του πλοίου και σύμφωνα με στοιχεία που έχει δημοσιεύσει σε μελέτη του ο IMO (IMO, 2014). Συγκεκριμένα, η τιμή της πραγματικής ταχύτητας λαμβάνεται ως συνάρτηση της ταχύτητας υπηρεσίας. Επιπλέον, στην εφαρμογή αυτή υπολογίζονται οι παραγόμενες αέριες εκπομπές κάθε πλοίου για ολόκληρο το έτος 2018, επομένως ιδανικά θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν πολλές τιμές ταχυτήτων που αντιστοιχούν στις πραγματικές ταχύτητες που ανέπτυξε το κάθε πλοίο σε κάθε ένα από τα ταξίδια του κατά τη διάρκεια ολόκληρου του έτους. Ενδεικτικά, σε μελέτες του IMO (IMO, 2014) και της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (European Commission, 2020) λαμβάνονται τιμές της ταχύτητας κάθε μία ώρα της ημέρας για όλες τις ημέρες του χρόνου. Όμως, στην παρούσα εργασία λαμβάνεται μία μέση ταχύτητα, με τον εναλλακτικό τρόπο υπολογισμού που περιγράφηκε, η οποία χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς των αερίων εκπομπών ολόκληρου του έτους.
- Το πραγματικό βύθισμα κατά τον υπολογισμό για κάθε πλοίο λαμβάνεται προσεγγιστικά με βάση τον τύπο του πλοίου και σύμφωνα με πίνακες που έχουν δημοσιευθεί στη σχετική βιβλιογραφία (ICCT, 2017). Όπως και στην περίπτωση της ταχύτητας, αυτή η μέση τιμή που λαμβάνεται για το πραγματικό βύθισμα είναι και η μοναδική τιμή που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των αερίων εκπομπών κάθε πλοίου για ολόκληρο το έτος 2018.

## 5.2 Αποτελέσματα εφαρμογής

Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της εφαρμογής μέσω κατάλληλων διαγραμμάτων.

### 5.2.1 Συνολικές εκπομπές CO<sub>2</sub>

Αρχικά, το ακόλουθο διάγραμμα περιλαμβάνει τις συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και για τα εκατό πλοία του δείγματος για κάθε μέθοδο υπολογισμού αλλά και τις αντίστοιχες εκπομπές από τις εγγραφές του MRV:

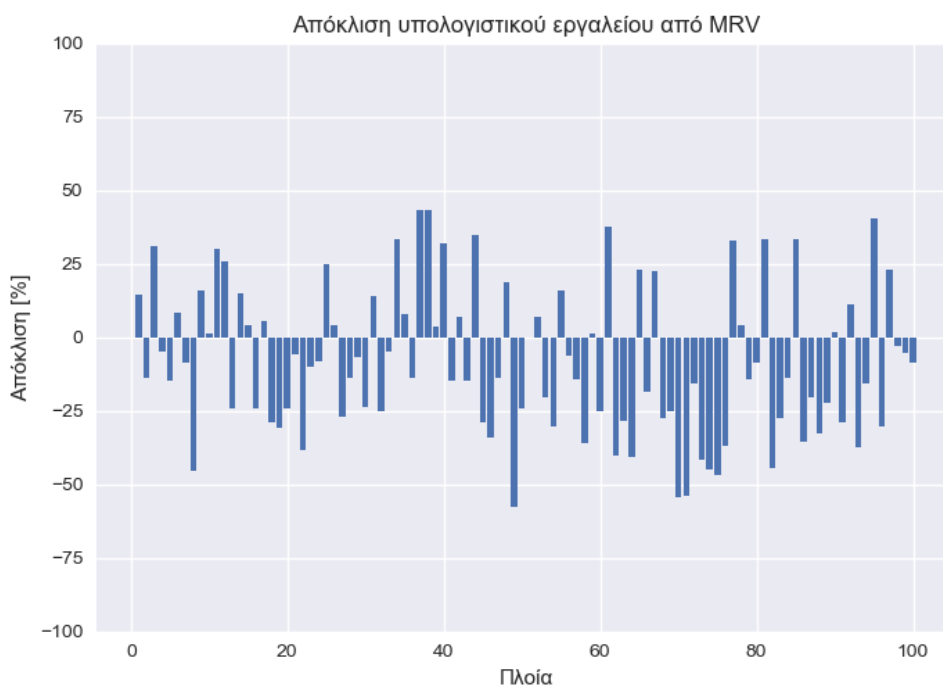


Σχήμα 4: Ετήσιες εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά μέθοδο

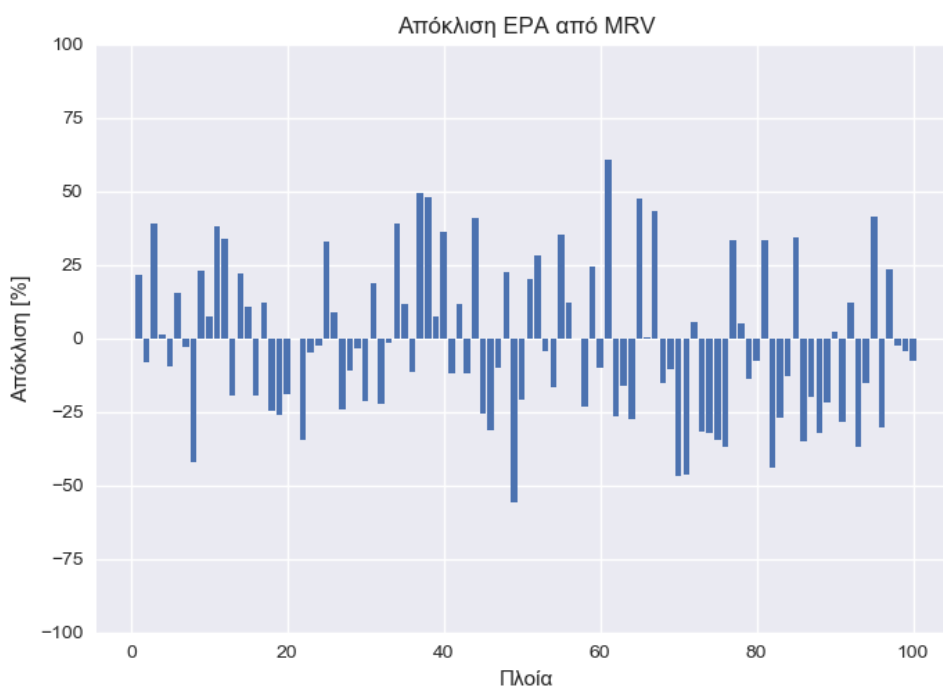
Όπως φαίνεται στο ανωτέρω σχήμα, τα αποτελέσματα των διαφορετικών μεθόδων και οι αντίστοιχες εγγραφές του MRV δεν διαφέρουν πολύ. Με άλλα λόγια, όσον αφορά τις συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) από τα εκατό πλοία του δείγματος, όλες οι μέθοδοι εμφανίζουν παρόμοια εικόνα τόσο μεταξύ τους όσο και με τις αντίστοιχες εγγραφές του MRV.

### 5.2.2 Απόκλιση αποτελεσμάτων μεθόδων από MRV για κάθε πλοίο

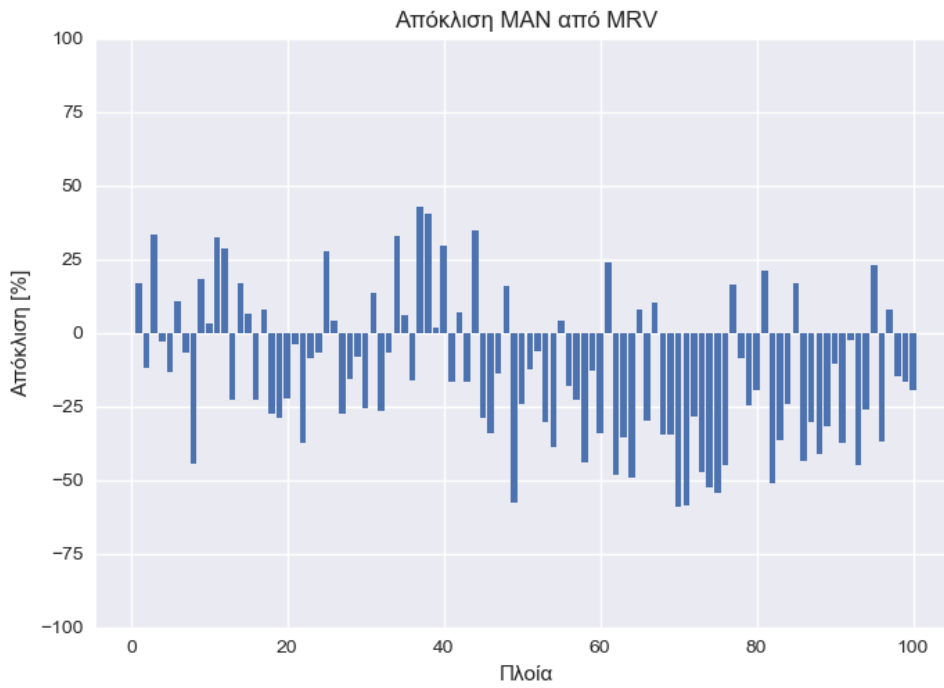
Εστιάζοντας στην απόκλιση των αποτελεσμάτων κάθε μεθόδου από τις αντίστοιχες εγγραφές του MRV, τα επόμενα διαγράμματα αποτυπώνουν την απόκλιση των αποτελεσμάτων για κάθε ένα από τα πλοία του δείγματος και για κάθε μέθοδο ξεχωριστά.



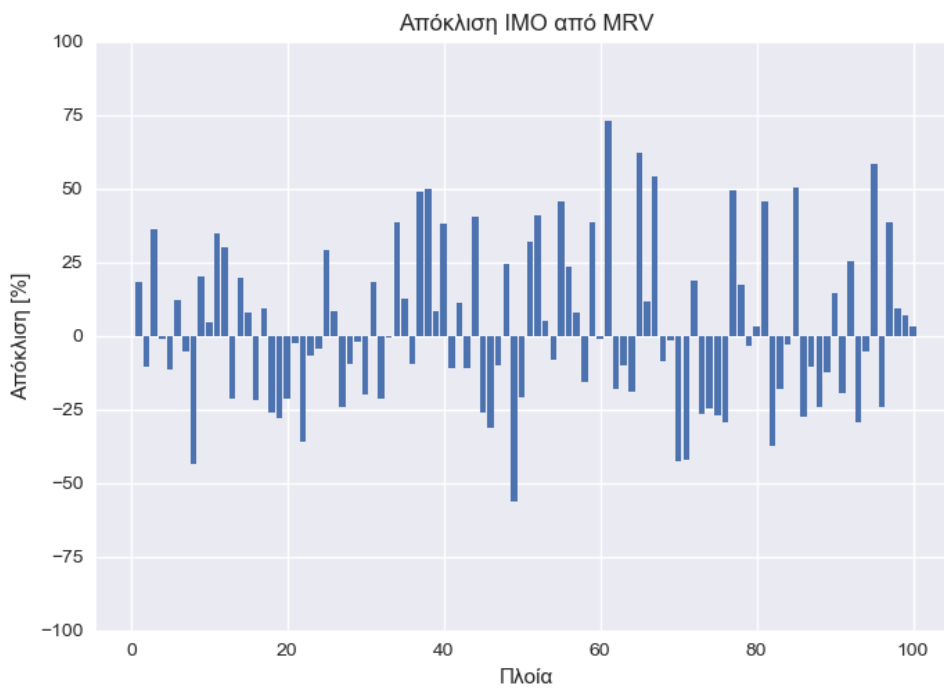
Σχήμα 5: Απόκλιση αποτελεσμάτων επιλεγθείσας μεθόδου από MRV



Σχήμα 6: Απόκλιση αποτελεσμάτων μεθόδου EPA από MRV



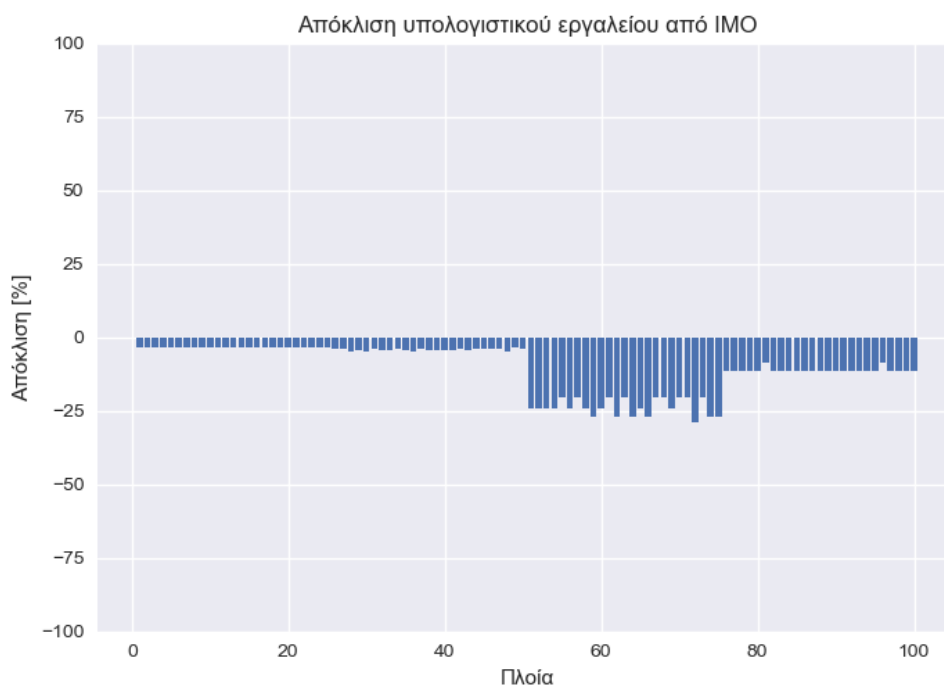
**Σχήμα 7: Απόκλιση αποτελεσμάτων μεθόδου MAN από MRV**



**Σχήμα 8: Απόκλιση αποτελεσμάτων μεθόδου IMO από MRV**

Από τα ανωτέρω γραφήματα, αξιολογείται ότι είναι το γεγονός πως όλες οι μέθοδοι εμφανίζουν σε αρκετά πλοία του δείγματος μεγάλες αποκλίσεις από τις αντίστοιχες εγγραφές του MRV, που σε ορισμένες περιπτώσεις ξεπερνούν το 30%, ενώ υπάρχουν και πολύ λίγες περιπτώσεις που η απόκλιση αυτή είναι ακόμα μεγαλύτερη. Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω λοιπόν, εξάγεται το συμπέρασμα πως σε περιπτώσεις μεμονωμένων πλοίων οι μέθοδοι μπορεί να εμφανίσουν σημαντική απόκλιση από τον MRV, η οποία όμως φαίνεται να εξαλείφεται σε επίπεδο συνολικών εκπομπών CO<sub>2</sub> καθώς αυξάνεται ο αριθμός των εξεταζόμενων πλοίων.

Τέλος, επειδή όπως έχει περιγραφεί η μέθοδος που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία αποτελεί μία παραλλαγή της μεθόδου του IMO, έχει ενδιαφέρον να εξεταστεί η απόκλιση των αποτελεσμάτων των δύο αυτών μεθόδων για κάθε πλοίο. Η απόκλιση λοιπόν των αποτελεσμάτων του υπολογιστικού εργαλείου από τα αντίστοιχα αποτελέσματα της μεθόδου IMO αποτυπώνονται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 9: Απόκλιση αποτελεσμάτων επιλεγθείσας μεθόδου από μέθοδο IMO

Από το ανωτέρω σχήμα φαίνεται πως το υπολογιστικό εργαλείο υποτιμά τις αέριες εκπομπές συγκριτικά με τη μέθοδο του IMO ή αντίστροφα η μέθοδος του IMO υπερεκτιμά τις αέριες εκπομπές συγκριτικά με το υπολογιστικό εργαλείο. Εν γένει, γίνεται σαφές πως και οι δύο μέθοδοι εμφανίζουν κατά κανόνα μεγάλη σύγκλιση, αλλά από την άλλη η προσπάθεια για όσο το δυνατόν πιο ακριβείς τιμές κάθε παραμέτρου υπολογισμού είναι σημαντική και με μεγάλη επίδραση στα ζητούμενα αποτελέσματα.

### 5.3 Παράγοντες που συμβάλλουν στην απόκλιση των αποτελεσμάτων από τον MRV

Στο σημείο αυτό καταγράφονται οι παράγοντες που ενδεχομένως ευθύνονται για την απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων του υπολογιστικού εργαλείου και των αντίστοιχων εγγραφών του MRV. Οι εν λόγω παράγοντες εκτιμάται πως αφορούν κυρίως τις παραδοχές της συγκεκριμένης εφαρμογής, όπως αναλύθηκαν στην αρχή του κεφαλαίου, αλλά και το γεγονός πως τα δύο εργαλεία χρησιμοποιούν διαφορετική μέθοδο υπολογισμού των αερίων εκπομπών που παράγονται από τα πλοία. Συγκεκριμένα:

- Για ορισμένα πλοία δεν ήταν διαθέσιμες οι στροφές του κινητήρα, με αποτέλεσμα η κατηγοριοποίησή του (αργόστροφος, μεσόστροφος, ταχύστροφος) να γίνει με βάση τον τύπο του πλοίου, ώστε να ληφθούν οι τιμές του SFOC από τους αντίστοιχους πίνακες.
- Δεν κατέστη εφικτό να βρεθούν τα πραγματικά δεδομένα για τις τιμές των ταχυτήτων που ανέπτυξε κάθε πλοίο κατά τη διάρκεια του έτους 2018, με αποτέλεσμα να ληφθεί από το υποστηρικτικό αρχείο μία μέση τιμή με βάση τον τύπο του πλοίου. Επιπροσθέτως, αυτή η τιμή της ταχύτητας θεωρήθηκε σταθερή για τον υπολογισμό των ετήσιων εκπομπών κάθε πλοίου.
- Όμοια με την ταχύτητα, λόγω έλλειψης δεδομένων ελήφθη προσεγγιστικά μία μέση τιμή από το υποστηρικτικό αρχείο για το πραγματικό βύθισμα κάθε πλοίου. Επιπλέον, αυτή η τιμή του βυθίσματος θεωρήθηκε σταθερή για τον υπολογισμό των αερίων εκπομπών κάθε πλοίου για ολόκληρο το έτος 2018.
- Σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία (Lighthouse, 2018), τα δεδομένα του MRV προέκυψαν με χρήση διαφορετικής μεθόδου από αυτήν που χρησιμοποιεί το υπολογιστικό εργαλείο στην παρούσα εργασία. Συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η μέθοδος του MRV περιλαμβάνει για κάθε πλοίο μέτρηση της κατανάλωσης καυσίμου και στη συνέχεια η τιμή της μέτρησης αυτής πολλαπλασιάζεται με τον κατάλληλο Emission Factor (EF). Τονίζεται πως τόσο στην παρούσα εργασία όσο και στον MRV χρησιμοποιούνται οι ίδιοι πίνακες EF που έχει δημοσιεύσει ο IMO. Δεδομένου μάλιστα πως το έτος που μελετάται είναι το πρώτο που τίθεται σε ισχύ η διαδικασία καταγραφής των εκπομπών από τον MRV, δεν υπάρχουν ακόμα μελέτες και αντίστοιχα στοιχεία για την ακρίβεια των εγγραφών αυτών και την ενδεχόμενη απόκλισή τους από τις πραγματικές εκπομπές.

## 6. Ανάλυση ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας αποτελεί μία μελέτη κατά την οποία εξετάζεται η επίδραση στα αποτελέσματα ενός μαθηματικού μοντέλου ή ενός συστήματος της μεταβολής των μεταβλητών του. Με άλλα λόγια, πρόκειται για μία διαδικασία κατά την οποία διαπιστώνεται πόσο «ευαίσθητο» είναι ένα μοντέλο στην αλλαγή των παραμέτρων του. Συγκεκριμένα, κατά την εκπόνηση της εν λόγω μελέτης, μεταβάλλεται η τιμή μίας μόνο μεταβλητής ενώ οι υπόλοιπες διατηρούνται σε μία σταθερή (ονομαστική) τιμή και καταγράφονται τα διάφορα αποτελέσματα που προκύπτουν. Στη συνέχεια, αυτή η μεταβλητή επιστρέφει στην αρχική της τιμή και η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε μία από τις υπόλοιπες μεταβλητές. Με τον τρόπο αυτό γίνεται σαφές κατά πόσο η μεταβολή και η αβεβαιότητα κάθε μίας μεταβλητής ξεχωριστά μπορεί να συνεισφέρει στη συνολική αβεβαιότητα και τη μεταβολή των αποτελεσμάτων ενός ολόκληρου συστήματος. Στο σημείο αυτό, λοιπόν, είναι χρήσιμο να παρουσιαστεί η ανάλυση ευαισθησίας για το πρόγραμμα υπολογισμού των αερίων εκπομπών από τη λειτουργία των πλοίων που αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε αναλυτικά στα προηγούμενα κεφάλαια. Όπως προκύπτει από το μαθηματικό μοντέλο στο οποίο έχει βασιστεί το υπολογιστικό εργαλείο, οι μεταβλητές για τις οποίες θα γίνει η ανάλυση ευαισθησίας είναι η πραγματική ταχύτητα που αναπτύσσει το πλοίο, το πραγματικό βύθισμα του πλοίου, ο συντελεστής επίδρασης του καιρού (weather factor) και ο συντελεστής επίδρασης της ρύπανσης της γάστρας (fouling factor).

### 6.1 Βήματα διαδικασίας

Η ανάλυση ευαισθησίας του υπολογιστικού εργαλείου πραγματοποιείται με βάση ένα πλοίο με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, τα οποία ορίζουν και την κατάσταση αναφοράς. Τα εν λόγω χαρακτηριστικά του πλοίου αποτελούν τις σταθερές και μεταβλητές του προγράμματος για τον υπολογισμό των αερίων εκπομπών. Σημειώνεται πως για τη διαδικασία αυτή επιλέχθηκε ένα από τα πλοία του δείγματος που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη που αναλύθηκε στις παραγράφους του προηγούμενου κεφαλαίου. Τα βήματα που ακολουθούνται λοιπόν για την υλοποίηση της ανάλυσης ευαισθησίας είναι τα εξής:

- Μεταβάλλεται η τιμή της πραγματικής ταχύτητας σε ένα εύρος τιμών από -1 kn έως +1 kn από την ταχύτητα αναφοράς, διατηρώντας όλες τις άλλες μεταβλητές σταθερές. Υπολογίζονται οι ετήσιες εκπομπές CO<sub>2</sub> που παράγονται από το πλοίο για αυτό το εύρος ταχυτήτων. Στη συνέχεια, η πραγματική ταχύτητα επιστρέφει στην αρχική της τιμή (ταχύτητα αναφοράς)
- Μεταβάλλεται το πραγματικό βύθισμα του πλοίου σε ένα εύρος τιμών από -2 m έως +2 m από το βύθισμα αναφοράς, διατηρώντας όλες τις άλλες μεταβλητές σταθερές. Υπολογίζονται οι ετήσιες εκπομπές CO<sub>2</sub> που παράγει το πλοίο για αυτό το εύρος βυθισμάτων. Στη συνέχεια, το πραγματικό βύθισμα επιστρέφει στην αρχική του τιμή (βύθισμα αναφοράς)

- Μεταβάλλεται ο συντελεστής επίδρασης του καιρού (weather factor) σε ένα εύρος τιμών από -0.02 έως +0.02 από τον αντίστοιχο συντελεστή αναφοράς, διατηρώντας όλες τις άλλες μεταβλητές σταθερές. Υπολογίζονται οι ετήσιες εκπομπές CO<sub>2</sub> για αυτό το εύρος συντελεστών επίδρασης του καιρού. Στη συνέχεια, ο weather factor επιστρέφει στην αρχική του τιμή (τιμή αναφοράς)
- Μεταβάλλεται ο συντελεστής επίδρασης της ρύπανσης της γάστρας (fouling factor) σε ένα εύρος τιμών από -0.04 έως +0.04 από τον αντίστοιχο συντελεστή αναφοράς, διατηρώντας όλες τις άλλες μεταβλητές σταθερές. Υπολογίζονται οι ετήσιες εκπομπές CO<sub>2</sub> για αυτό το εύρος συντελεστών επίδρασης της ρύπανσης της γάστρας. Στη συνέχεια, ο fouling factor επιστρέφει στην αρχική του τιμή (τιμή αναφοράς)

Συνοπτικά, οι μεταβλητές με τις αντίστοιχες τιμές αναφοράς και τα εύρη τιμών στα οποία κυμαίνονται καταγράφονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 14: Τιμές μεταβλητών

	Κατάσταση αναφοράς	Ανάλυση ευαισθησίας
<b>Πραγματική ταχύτητα [kn]</b>	13,50	[12,50 , 14,50]
<b>Πραγματικό βύθισμα [m]</b>	12,50	[10,50 , 14,50]
<b>Weather factor</b>	0,89	[0,87 , 0,91]
<b>Fouling factor</b>	0,94	[0,90 , 0,98]

Σημειώνεται πως τα όρια για τα εύρη τιμών των weather και fouling factors επιλέχθηκαν με βάση τον IMO (IMO, 2014). Για την ταχύτητα και το βύθισμα επιλέχθηκε ένα ελάχιστο ρεαλιστικό εύρος τιμών για την ανάδειξη της πραγματικής τους επίδρασης.

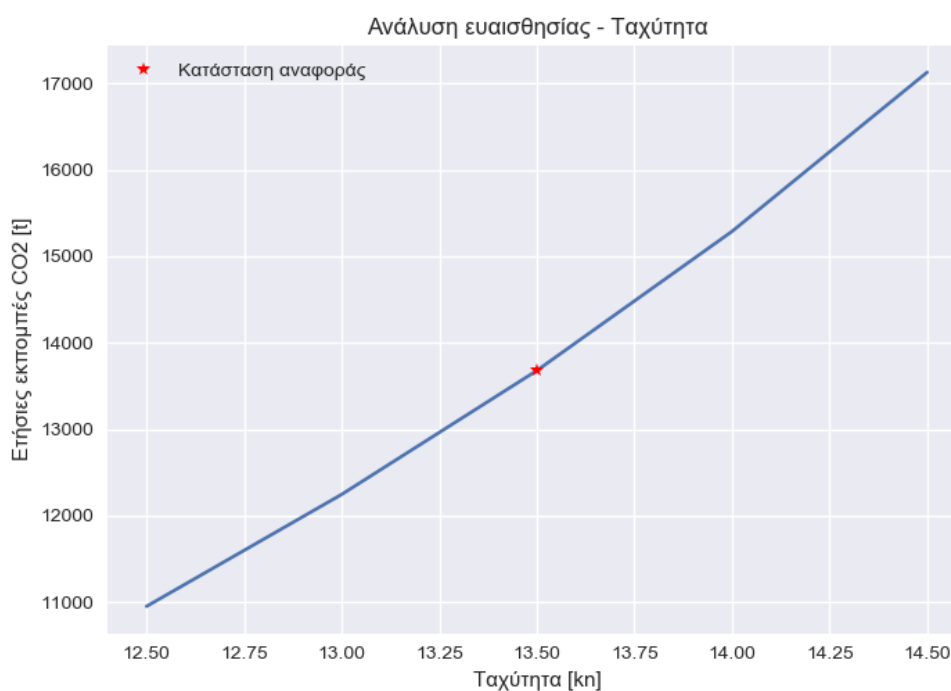
## 6.2 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών από τη διαδικασία που περιγράφηκε πιο πάνω, απεικονίζονται σε κατάλληλα διαγράμματα μέσω των οποίων γίνεται σαφές πόσο επηρεάζει η μεταβολή κάθε μίας μεταβλητής την τελική παραγωγή αερίων εκπομπών από τα πλοία. Στις επόμενες παραγράφους του παρόντος κεφαλαίου μελετώνται τα αποτελέσματα για κάθε μία μεταβλητή ξεχωριστά και στο τέλος εξάγονται τα ζητούμενα συμπεράσματα για την «ευαισθησία» του υπολογιστικού εργαλείου. Για τους εν λόγω υπολογισμούς και την κατασκευή των αντίστοιχων διαγραμμάτων αναπτύχθηκε κώδικας στη γλώσσα προγραμματισμού Python.



### 6.2.1 Πραγματική ταχύτητα

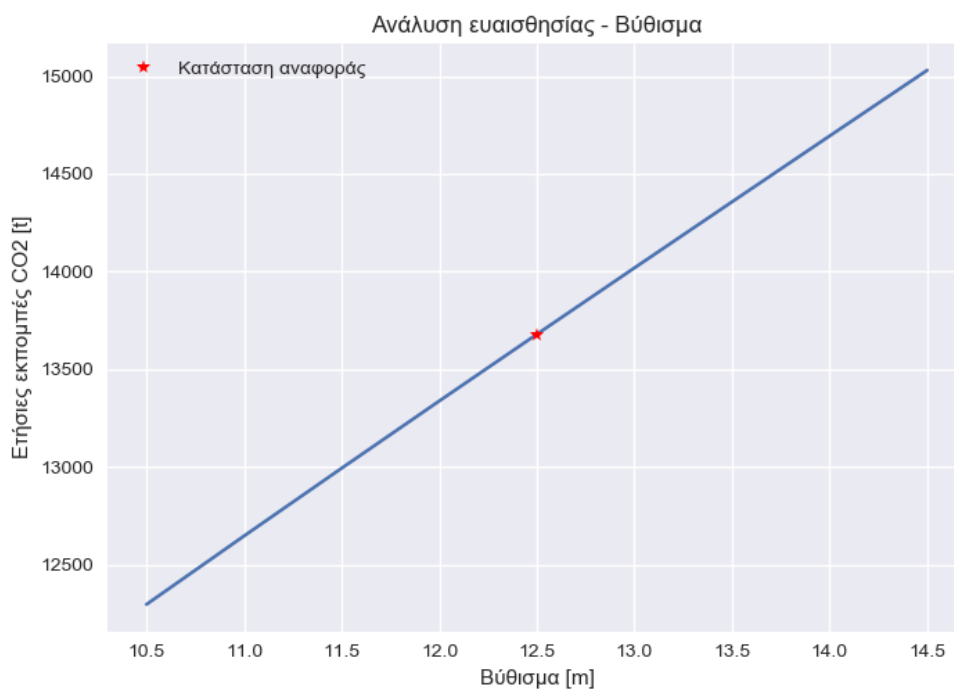
Αρχικά, από τη φυσική ερμηνεία του προβλήματος προκύπτουν ορισμένα συμπεράσματα στα οποία αναμένονται να οδηγήσουν και τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί κατά κάποιον τρόπο να γίνει και μία επαλήθευση της σωστής λειτουργίας του προγράμματος, εφόσον τα αποτελέσματά του συμφωνούν με τα αναμενόμενα συμπεράσματα από τη φυσική ερμηνεία. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης λοιπόν, η πραγματική ταχύτητα που αναπτύσσει το πλοίο αναμένεται να έχει καθοριστικό ρόλο στην ποσότητα των αερίων εκπομπών που παράγονται από αυτό. Η επίτευξη μεγαλύτερης ταχύτητας απαιτεί μεγαλύτερη ισχύ από τον κινητήρα, γεγονός που ισοδυναμεί με μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου και άρα μεγαλύτερη ποσότητα αερίων εκπομπών από το πλοίο. Επομένως, η οποιαδήποτε μεταβολή στην τιμή της πραγματικής ταχύτητας του πλοίου, αναμένεται να επιφέρει σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα του υπολογιστικού εργαλείου. Πράγματι, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα που ακολουθεί, η ανάλυση ευαισθησίας οδηγεί σε αυτό ακριβώς το συμπέρασμα.



Σχήμα 10: Επίδραση της ταχύτητας στα αποτελέσματα του υπολογιστικού εργαλείου

## 6.2.2 Πραγματικό βύθισμα

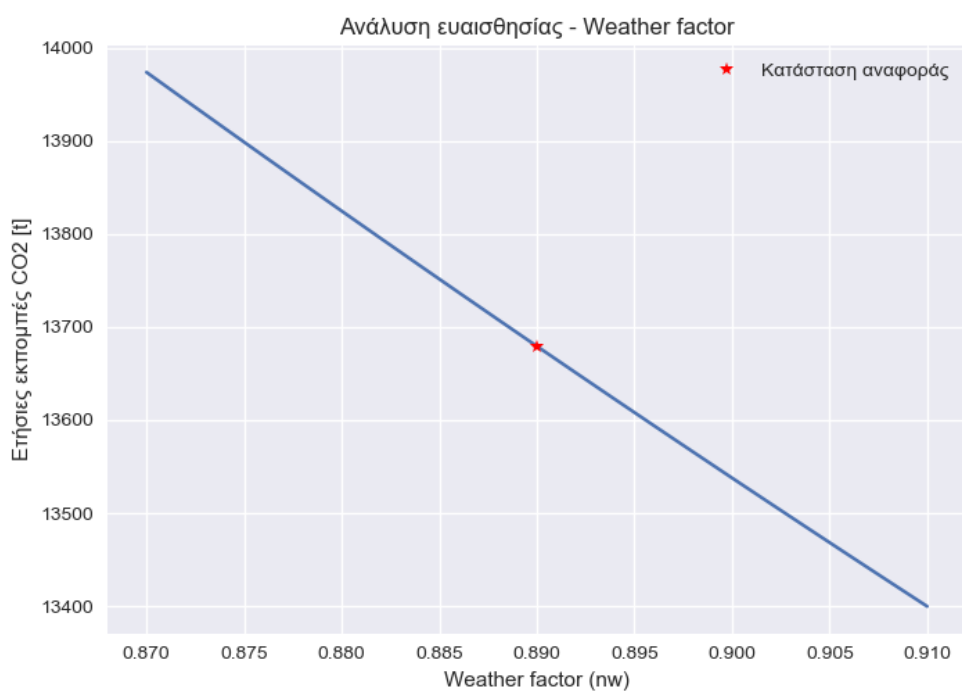
Από τη φυσική ερμηνεία του προβλήματος της παραγωγής αερίων εκπομπών από τα πλοία, το πραγματικό βύθισμα του πλοίου αναμένεται να έχει επίσης έναν σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα. Μεγαλύτερο βύθισμα ισοδυναμεί κατά κανόνα με μεγαλύτερη βρεχόμενη επιφάνεια και συνεπώς μεγαλύτερη συνολική αντίσταση για το πλοίο. Επομένως, για δεδομένη επιθυμητή ταχύτητα του πλοίου, όσο μεγαλώνει το βύθισμα αυξάνεται και η απαίτηση ισχύος ώστε το πλοίο να υπερνικήσει την αυξανόμενη αντίσταση. Η αύξηση στην απαίτηση ισχύος οδηγεί με τη σειρά της σε μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου και άρα σε αύξηση των αερίων εκπομπών. Συνεπώς, αυτό που αναμένεται από τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας είναι όσο αυξάνεται η τιμή του πραγματικού βυθίσματος να αυξάνονται σε σημαντικό βαθμό και οι παραγόμενες αέριες εκπομπές. Το διάγραμμα που ακολουθεί αποτυπώνει τα αποτελέσματα τα οποία, όπως φαίνεται, συμφωνούν με τη φυσική ερμηνεία που δόθηκε.



Σχήμα 11: Επίδραση του βυθίσματος στα αποτελέσματα του υπολογιστικού εργαλείου

### 6.2.3 Συντελεστής επίδρασης καιρού (Weather factor, $n_w$ )

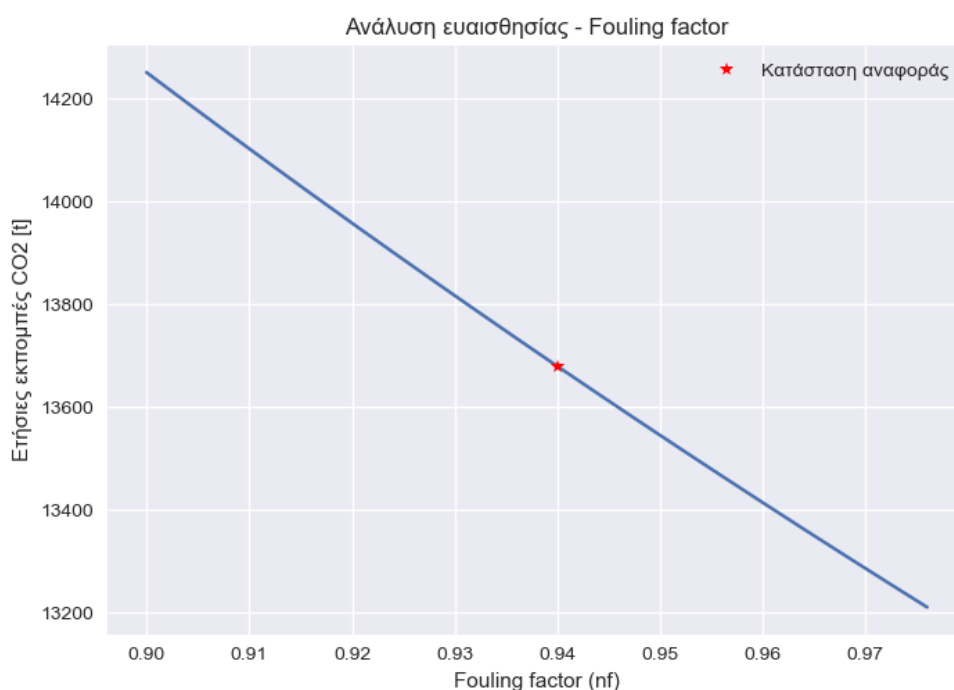
Από τη φυσική ερμηνεία του προβλήματος της παραγωγής αερίων εκπομπών από τη λειτουργία των πλοίων, μπορεί επίσης να γίνει και μία αρχική εκτίμηση για την επίδραση του weather factor στα αποτελέσματα του υπολογιστικού εργαλείου. Συγκεκριμένα, κακές καιρικές συνθήκες οδηγούν στη δημιουργία έντονων κυματισμών με αποτέλεσμα να προκύπτει αύξηση της συνολικής αντίστασης του πλοίου. Συνεπώς, για να υπερνικηθεί αυτή η αυξημένη αντίσταση από το πλοίο χρειάζεται μεγαλύτερη ισχύς και άρα μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένες αέριες εκπομπές από το πλοίο. Με δεδομένο λοιπόν ότι όσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση του καιρού τόσο ο παράγοντας  $n_w$  ελαττώνεται, αναμένεται η ανάλυση ευαισθησίας να δείξει ότι μείωση της τιμής του weather factor επιφέρει αύξηση στα αποτελέσματα του υπολογιστικού εργαλείου για τις αέριες εκπομπές. Πράγματι, αυτό διαπιστώνεται από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 12: Επίδραση weather factor στα αποτελέσματα του υπολογιστικού εργαλείου

#### 6.2.4 Συντελεστής επίδρασης ρύπανσης της γάστρας (Fouling factor, $\eta_f$ )

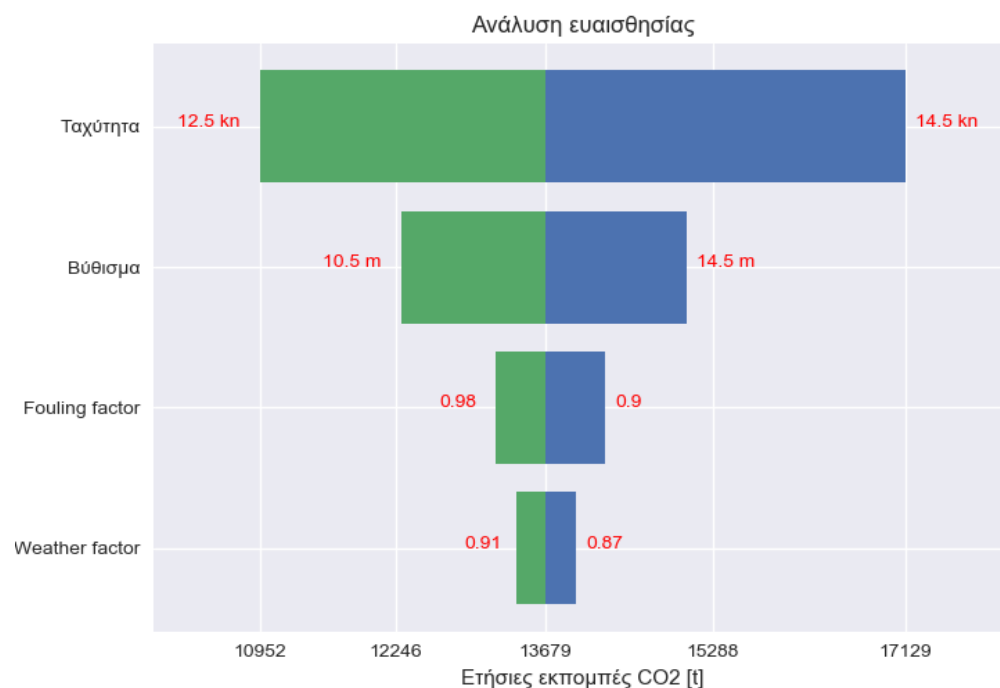
Κατά τη λογική των προηγούμενων παραγράφων, αρχικά γίνεται μία εκτίμηση με βάση τη φυσική ερμηνεία του προβλήματος. Σύμφωνα με αυτή, αύξηση της ρύπανσης της γάστρας ισοδυναμεί με μεγαλύτερη τραχύτητα των επιφανειών της και συνεπώς αυξημένη συνολική αντίσταση του πλοίου. Η αυξημένη αντίσταση με τη σειρά της οδηγεί σε μεγαλύτερη απαίτηση ισχύος και άρα μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου, κάτι που συνεπάγεται αύξηση των αερίων εκπομπών από το πλοίο. Με δεδομένο λοιπόν ότι μεγαλύτερη ρύπανση της γάστρας ισοδυναμεί με μικρότερο fouling factor, αναμένεται η ανάλυση ευαισθησίας να δείξει ότι μείωση της τιμής του fouling factor επιφέρει αύξηση στα αποτελέσματα του υπολογιστικού εργαλείου για τις παραγόμενες αέριες εκπομπές. Στο ακόλουθο διάγραμμα διαπιστώνεται πως τα αποτελέσματα συμφωνούν πράγματι με τη φυσική ερμηνεία που δόθηκε.



Σχήμα 13: Επίδραση fouling factor στα αποτελέσματα του υπολογιστικού εργαλείου

### 6.3 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα διαγράμματα των προηγούμενων παραγράφων αποτυπώνονται καλύτερα στο ακόλουθο γράφημα, γνωστό ως tornado chart. Το εν λόγω γράφημα αποτελεί μία ειδική περίπτωση bar chart, στο οποίο κάθε μπάρα αποτυπώνει την συνολική μεταβολή που επιφέρει στο σύστημα η μεταβολή μίας μεταβλητής. Οι μπάρες τοποθετούνται οριζόντια με τρόπο ώστε η μεγαλύτερη μπάρα, δηλαδή η μπάρα που αντιστοιχεί στη μεταβλητή με τη μεγαλύτερη επίδραση, να βρίσκεται στην κορυφή του διαγράμματος. Έτσι, το διάγραμμα παίρνει τη μορφή ανεμοστρόβιλου (στα αγγλικά tornado) από όπου έχει πάρει το όνομά του.



Σχήμα 14:Ανάλυση ευαισθησίας - Tornado chart

Από όλα τα παραπάνω γίνεται εμφανές πως τη μεγαλύτερη επίδραση στα αποτελέσματα του υπολογιστικού εργαλείου, δηλαδή στις αέριες εκπομπές που παράγονται από τα πλοία, επιφέρει η μεταβολή στην τιμή της πραγματικής ταχύτητας του πλοίου. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει ακόμα περισσότερο την ανάγκη για συχνότερη και ακριβέστερη καταγραφή της πραγματικής ταχύτητας που αναπτύσσει το πλοίο κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού αλλά και την ανάγκη πρόσβασης σε αντίστοιχες βάσεις δεδομένων για την χρήση υπολογιστικών εργαλείων όπως αυτό που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία. Τη δεύτερη μεγαλύτερη επίδραση στα αποτελέσματα του προγράμματος εμφανίζει η μεταβολή της τιμής του πραγματικού βυθίσματος του πλοίου. Τέλος, μικρότερη αλλά αξιοσημείωτη επίδραση στις αέριες εκπομπές επιφέρουν οι μεταβολές των fouling και weather factors.

## 7. Πλήρης εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου

Στα προηγούμενα κεφάλαια πραγματοποιήθηκε εκτενής περιγραφή του υπολογιστικού εργαλείου για τον αναλυτικό υπολογισμό των αερίων εκπομπών από τη λειτουργία των πλοίων. Περιγράφηκε η μεθοδολογία και το μαθηματικό μοντέλο στα οποία βασίζεται το εργαλείο, ο τρόπος λειτουργίας του, τα δεδομένα εισόδου αλλά και τα αποτελέσματα που παράγει. Υπενθυμίζεται πως η βασική λογική του εν λόγω υπολογιστικού εργαλείου είναι ότι διαβάζει ένα αρχείο με ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά ενός ή περισσοτέρων πλοίων και υπολογίζει τις αέριες εκπομπές που παράγονται από αυτά σε κατάσταση πλεύσης στην ανοικτή θάλασσα. Τα αποτελέσματα αφορούν εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), οξειδίων του θείου (SO<sub>x</sub>), οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και αιωρούμενων σωματιδίων (PM). Επιπλέον, το εργαλείο αυτό παρέχει ανάλυση των εν λόγω αποτελεσμάτων ανά τύπο πλοίου αλλά και ανά τύπο αέριας εκπομπής, έτσι ώστε ο χρήστης να αποκτά μία ολοκληρωμένη εικόνα για τις παραγόμενες αέριες εκπομπές. Επιπροσθέτως, πραγματοποιείται ανάλυση με βάση την ηλικία και την ταχύτητα των πλοίων. Όλα τα ανωτέρω παρουσιάζονται όχι μόνο με αντίστοιχους πίνακες αλλά και με κατάλληλα διαμορφωμένα διαγράμματα, καθώς η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων συμβάλλει στην καλύτερη κατανόησή τους.

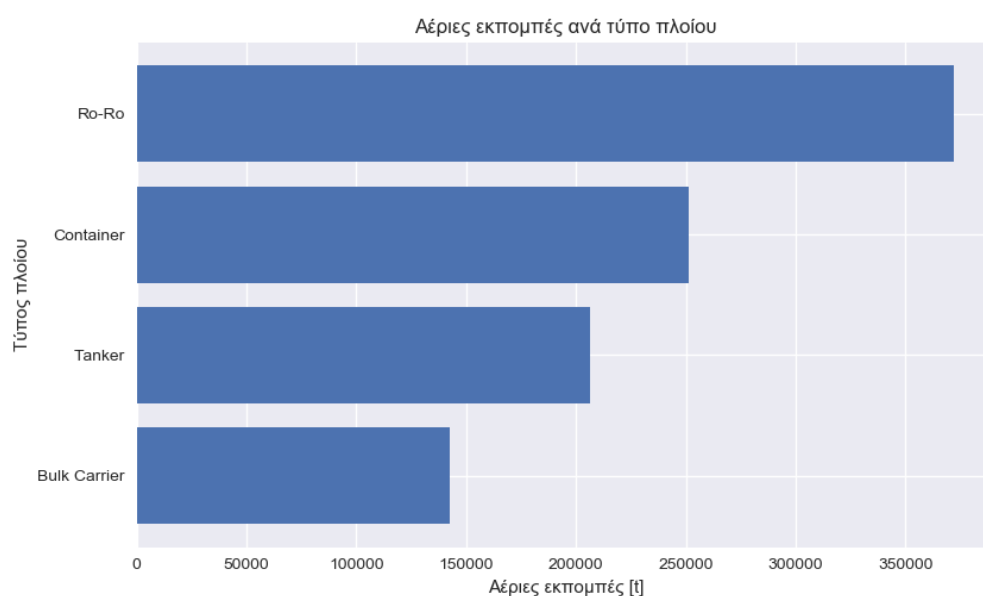
Στο σημείο αυτό, λοιπόν, θα παρουσιαστεί μία πλήρης εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου, με τη χρήση πραγματικών δεδομένων από υπάρχοντα πλοία. Η εφαρμογή αυτή εστιάζει στη λεπτομερή παρουσίαση των αποτελεσμάτων και των αναλύσεων που παράγει το εργαλείο. Για αυτή την εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε το δείγμα των 100 πλοίων που χρησιμοποιήθηκε και στο κεφάλαιο 5. Υπενθυμίζεται πως το εν λόγω δείγμα αποτελείται από 25 Bulk Carriers, 25 Tankers, 25 Containers και 25 Ro-Ro που κινήθηκαν από ή/και προς λιμάνια του Ευρωπαϊκού Οικονομικού Χώρου. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στις σχετικές παραγράφους αφορούν τις αέριες εκπομπές από τα συγκεκριμένα πλοία για το έτος 2018. Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης εφαρμογής δεν ήταν διαθέσιμες οι τιμές της πραγματικής ταχύτητας και του πραγματικού βυθίσματος και για αυτό το λόγο ελήφθησαν από το υποστηρικτικό αρχείο του υπολογιστικού εργαλείου, όπως περιγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.

## 7.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων ανά τύπο πλοίου

Στην παράγραφο αυτή γίνεται ανάλυση των παραγόμενων αερίων εκπομπών που υπολογίστηκαν από το εργαλείο ανά τύπο πλοίου. Με αυτό τον τρόπο διαπιστώνεται από ποιον τύπο πλοίου προέρχεται η μεγαλύτερη ποσότητα αερίων εκπομπών συνολικά και επομένως ποιος τύπος πλοίου επιβαρύνει περισσότερο με τη λειτουργία του το περιβάλλον. Επιπλέον, εξετάζεται ποιος τύπος πλοίου παράγει περισσότερο κάθε έναν από τους εξεταζόμενους τύπους αερίων εκπομπών ξεχωριστά. Τέλος, γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων συναρτήσει της ταχύτητας των πλοίων για κάθε τύπο πλοίου.

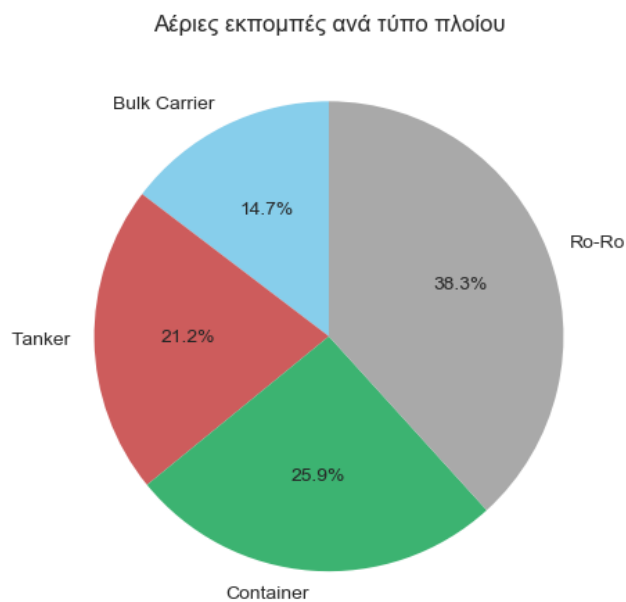
### 7.1.1 Παραγωγή συνολικών αερίων εκπομπών ανά τύπο πλοίου

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα για τη συνολική παραγωγή αερίων εκπομπών, ο τύπος πλοίου που ευθύνεται για τη μεγαλύτερη ποσότητα των παραγόμενων αερίων εκπομπών είναι ο Ro-Ro. Δεύτερος σε παραγωγή αερίων εκπομπών είναι ο τύπος Container και ακολουθούν τα Tanker. Τέλος, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του υπολογιστικού εργαλείου, τα πλοία με τις λιγότερες παραγόμενες αέριες εκπομπές είναι εκείνα τύπου Bulk Carrier. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 15: Ετήσιες αέριες εκπομπές ανά τύπο πλοίου

Η ποσοστιαία συμβολή κάθε τύπου πλοίου στις συνολικές αέριες εκπομπές παρουσιάζεται στο ακόλουθο γράφημα:

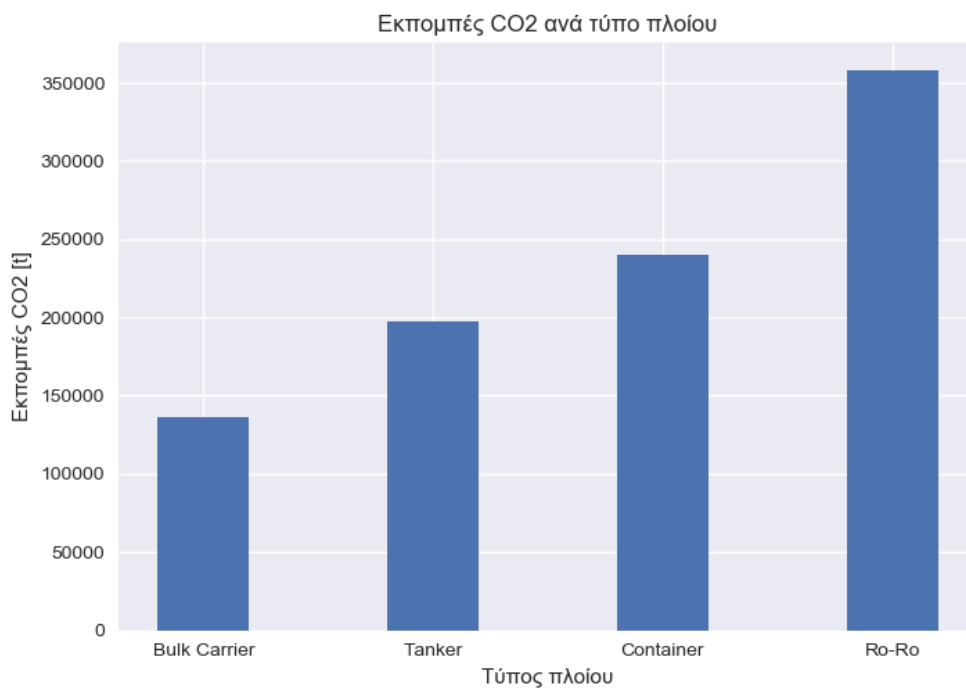


**Σχήμα 16: Ποσοστιαία συμβολή κάθε τύπου πλοίου στις ετήσιες αέριες εκπομπές**

### 7.1.2 Παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) ανά τύπο πλοίου

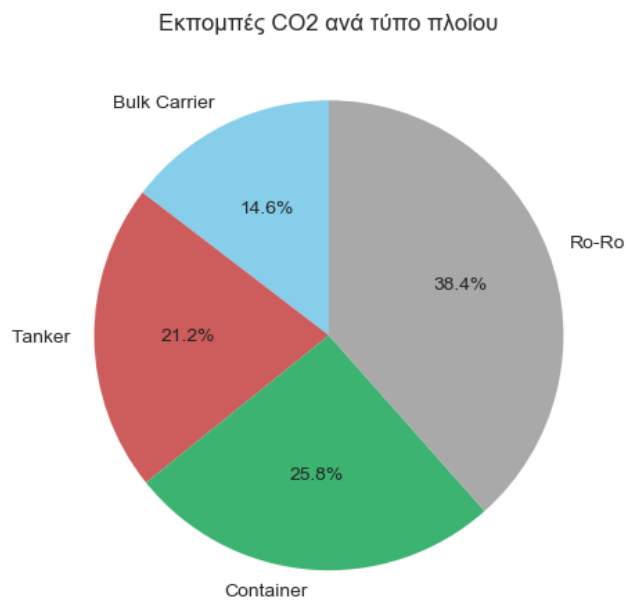
Στο σημείο αυτό παρατίθενται τα αποτελέσματα για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) ανά τύπο πλοίου, όπως προέκυψαν από το υπολογιστικό εργαλείο. Όπως και στις συνολικές αέριες εκπομπές, έτσι και στις εκπομπές CO<sub>2</sub> παρατηρείται πως η μεγαλύτερη ποσότητα παράγεται από τα πλοία τύπου Ro-Ro ενώ ακολουθούν τα πλοία τύπου Container, Tanker και τέλος Bulk Carrier. Τα εν λόγω αποτελέσματα παρουσιάζονται και στο ακόλουθο διάγραμμα:





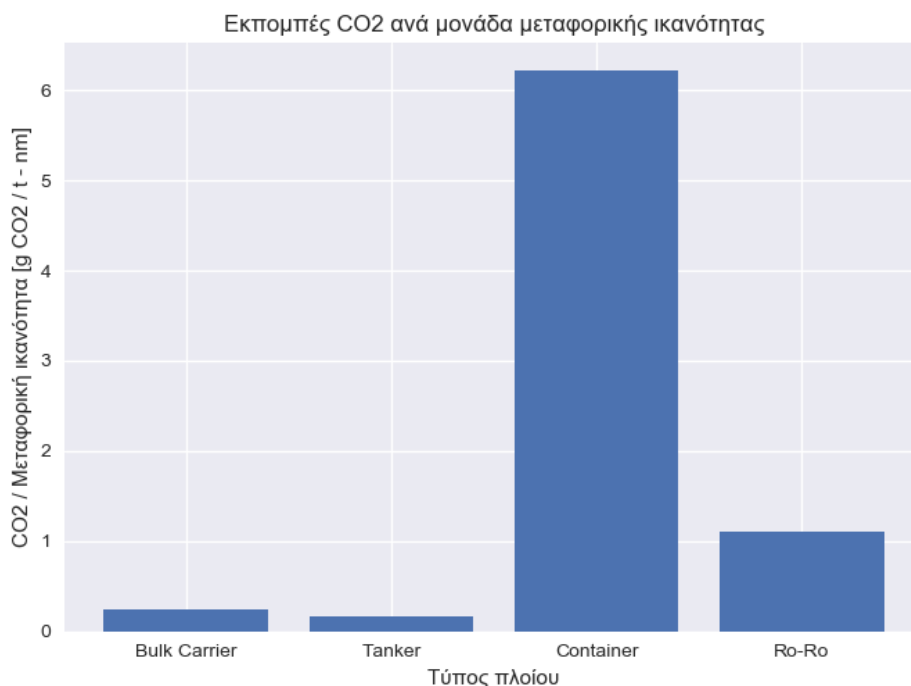
**Σχήμα 17:** Ετήσιες εκπομπές CO2 ανά τύπο πλοίου

Μάλιστα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, η ποσοστιαία συμβολή κάθε τύπου πλοίου στις εκπομπές CO<sub>2</sub>, είναι σχεδόν ίδια με εκείνη στις συνολικές αέριες εκπομπές.



**Σχήμα 18:** Ποσοστιαία συμβολή κάθε τύπου πλοίου στις ετήσιες εκπομπές CO2

Στο σημείο αυτό έχει ενδιαφέρον να εξεταστεί η παραγωγή CO<sub>2</sub> σε γραμμάρια ανά μονάδα μεταφορικής ικανότητας σε τόνο - μίλια. Αυτή είναι η λογική ανάλυσης του Δείκτη Ενεργειακής Αποδοτικότητας (Energy Efficiency Design Index, EEDI) όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2. Τα εν λόγω αποτελέσματα αποτυπώνονται στο ακόλουθο γράφημα:

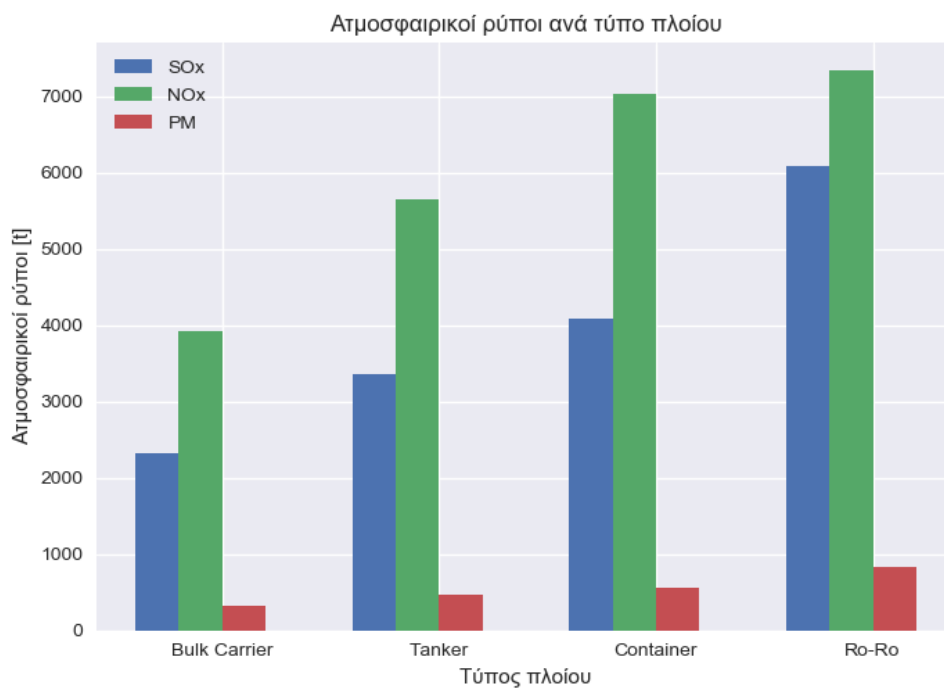


Σχήμα 19: Παραγωγή CO<sub>2</sub> ανά μονάδα μεταφορικής ικανότητας

Όπως φαίνεται στο ανωτέρω σχήμα, η εικόνα τώρα είναι διαφορετική σε σχέση με τις απόλυτες τιμές εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά τύπο πλοίου. Στην περίπτωση αυτή τα πλοία τύπου Container φαίνεται να εμφανίζουν τη χειρότερη εικόνα όσον αφορά την ενεργειακή τους απόδοση, ενώ ακολουθούν τα πλοία τύπου Ro-Ro και εκείνα τύπου Bulk Carrier. Τέλος, ως ενεργειακά αποδοτικότερα εμφανίζονται τα πλοία τύπου Tanker.

### 7.1.3 Παραγωγή ατμοσφαιρικών ρύπων ανά τύπο πλοίου

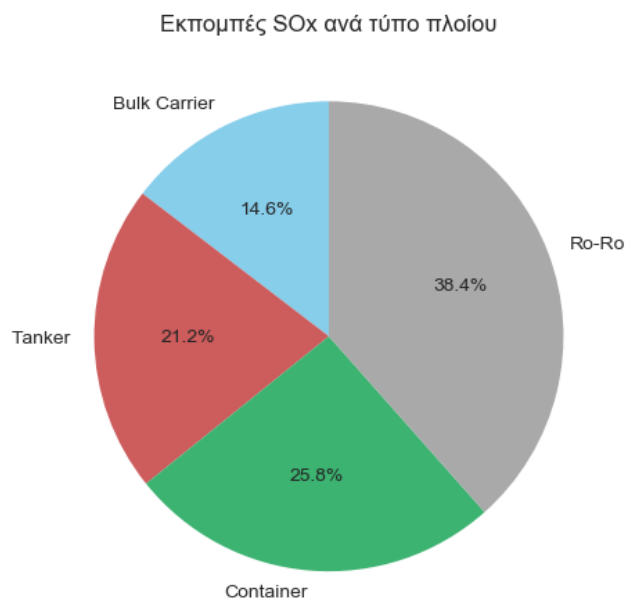
Η παραγωγή των ατμοσφαιρικών ρύπων, δηλαδή των οξειδίων του θείου (SO<sub>x</sub>), των οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και των αιωρούμενων σωματιδίων (PM), ανά τύπο πλοίου αποτυπώνεται στο γράφημα που ακολουθεί.



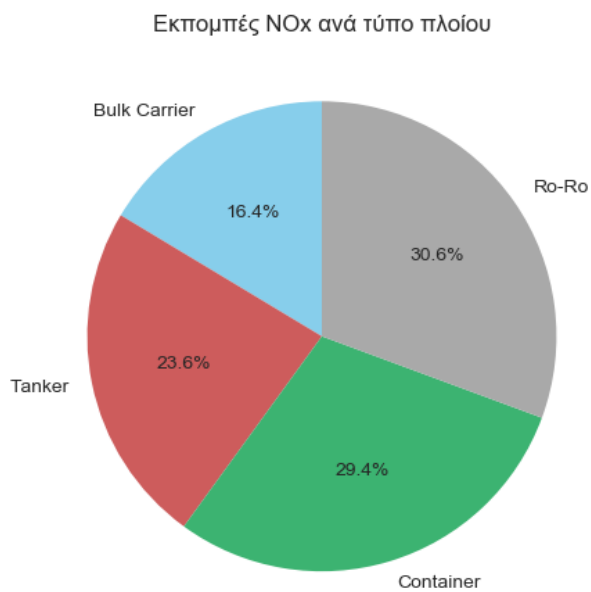
**Σχήμα 20:Ετήσιες εκπομπές SOx,NOx και PM ανά τύπο πλοίου**

Σύμφωνα με το ανωτέρω σχήμα, τα πλοία τύπου Ro-Ro είναι εκείνα που παράγουν τη μεγαλύτερη ποσότητα SOx, NOx και PM.

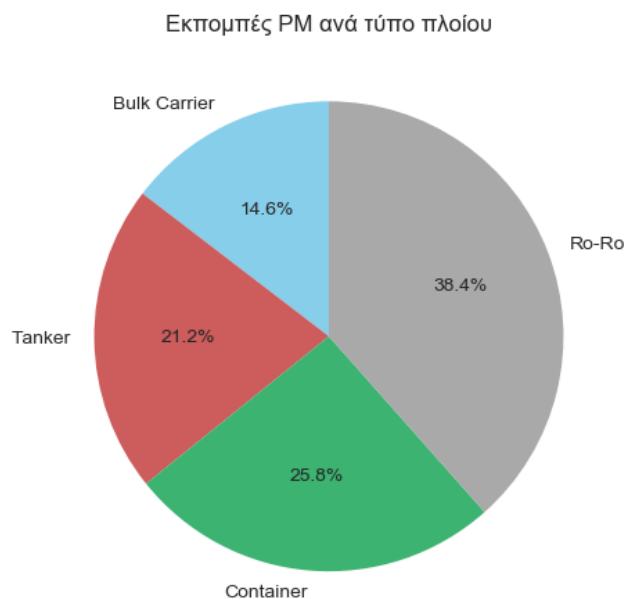
Η ποσοστιαία συμβολή κάθε τύπου πλοίου στην παραγωγή κάθε ατμοσφαιρικού ρύπου παρουσιάζεται στα ακόλουθα σχήματα:



Σχήμα 21: Ποσοστιαία συμβολή κάθε τύπου πλοίου στην ετήσια παραγωγή SO<sub>x</sub>



Σχήμα 22: Ποσοστιαία συμβολή κάθε τύπου πλοίου στην ετήσια παραγωγή NO<sub>x</sub>



**Σχήμα 23: Ποσοστιαία συμβολή κάθε τύπου πλοίου στην ετήσια παραγωγή PM**

Μία αξιοσημείωτη παρατήρηση που προκύπτει από τα ανωτέρω διαγράμματα είναι ότι η ποσοστιαία συμβολή κάθε τύπου πλοίου στις εκπομπές CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> και PM είναι σχεδόν ίδια ενώ μόνο για την παραγωγή NO<sub>x</sub> τα πλοία τύπου Bulk Carrier, Tanker και Container παρουσιάζουν αυξημένη ποσοστιαία συμβολή και τα πλοία τύπου Ro-Ro μειωμένη, συγκριτικά πάντα με την αντίστοιχη συμβολή τους στις υπόλοιπες εκπομπές. Το γεγονός αυτό φαίνεται καλύτερα σε επόμενη παράγραφο που εξετάζεται η αναλογία των ατμοσφαιρικών ρύπων σε κάθε τύπο πλοίου.

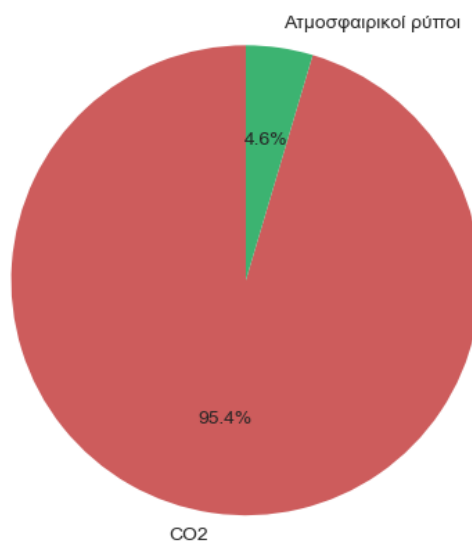
#### 7.1.4 Αναλογία αερίων εκπομπών ανά τύπο πλοίου

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται τόσο η αναλογία των συνολικών αερίων εκπομπών σε κάθε τύπο πλοίου ξεχωριστά όσο και ειδικότερα η αναλογία των ατμοσφαιρικών ρύπων σε κάθε τύπο πλοίου ξεχωριστά. Με την ανάλυση αυτή θα γίνει σαφές το πως κατανέμονται οι παραγόμενες αέρια εκπομπές σε κάθε έναν από τους εξεταζόμενους τύπους πλοίων.

##### ➤ Αναλογία συνολικών αερίων εκπομπών σε πλοία τύπου Bulk Carrier

Στο γράφημα που ακολουθεί αποτυπώνεται η σύσταση των συνολικών παραγόμενων αερίων εκπομπών από τα πλοία τύπου Bulk Carrier του δείγματος. Συγκεκριμένα, διαπιστώνεται η ποσοστιαία συμβολή του διοξειδίου του άνθρακα και των ατμοσφαιρικών ρύπων στις συνολικές αέρια εκπομπές.

#### Αναλογία αερίων εκπομπών - Bulk Carrier

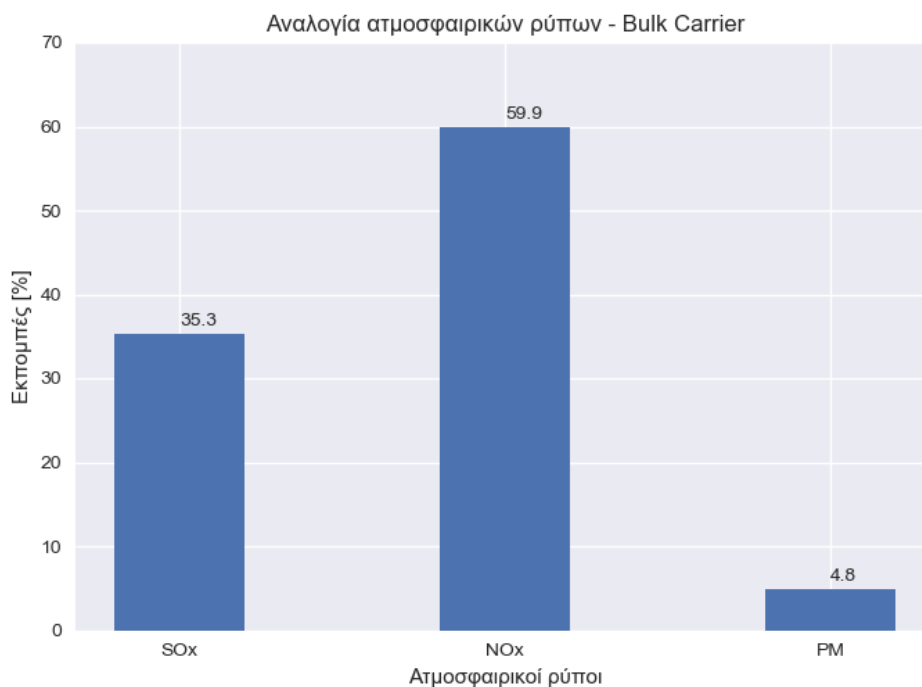


Σχήμα 24:Αναλογία ετήσιων αερίων εκπομπών σε πλοία τύπου Bulk Carrier

Σύμφωνα με το ανωτέρω διάγραμμα το 95,4 %, δηλαδή η συντριπτική πλειονότητα των αερίων εκπομπών των πλοίων τύπου Bulk Carrier, αφορά το διοξείδιο του άνθρακα. Το ποσοστό που αφορά του ατμοσφαιρικούς ρύπους εκτιμάται μόλις στο 4,6 %.

#### ➤ Αναλογία ατμοσφαιρικών ρύπων σε πλοία τύπου Bulk Carrier

Στο διάγραμμα που ακολουθεί απεικονίζεται η ποσοστιαία συμβολή κάθε ατμοσφαιρικού ρύπου στις συνολικές εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων από τα πλοία τύπου Bulk Carrier του δείγματος. Με άλλα λόγια διαπιστώνεται ποιος συγκεκριμένος ατμοσφαιρικός ρύπος παράγεται περισσότερο από τα πλοία τύπου Bulk Carrier.



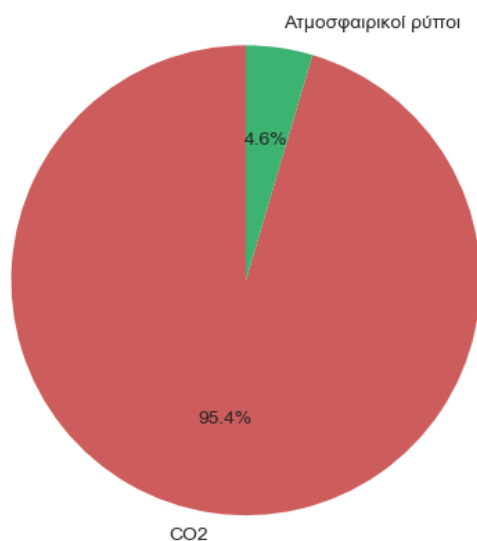
**Σχήμα 25:Αναλογία ετήσιων ατμοσφαιρικών ρύπων σε πλοία τύπου Bulk Carrier**

Μέσω του παραπάνω διαγράμματος γίνεται σαφές πως το μεγαλύτερο μέρος των ατμοσφαιρικών ρύπων, σε ποσοστό 59,9 %, των πλοίων τύπου Bulk Carrier αντιστοιχεί σε εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NOx). Δεύτερος ατμοσφαιρικός ρύπος που παράγεται περισσότερο είναι τα οξείδια του θείου (SOx), σε ποσοστό 35,3 %. Τέλος, η εκπομπή αιωρούμενων σωματιδίων (PM) εκτιμάται ότι ανέρχεται σε ποσοστό 4,8 %.

➤ **Αναλογία συνολικών αερίων εκπομπών σε πλοία τύπου Tanker**

Η ποσοστιαία συμβολή του διοξειδίου του άνθρακα και των ατμοσφαιρικών ρύπων στις συνολικές αέριες εκπομπές για τα πλοία τύπου Tanker είναι η ακόλουθη:

#### Αναλογία αερίων εκπομπών - Tanker



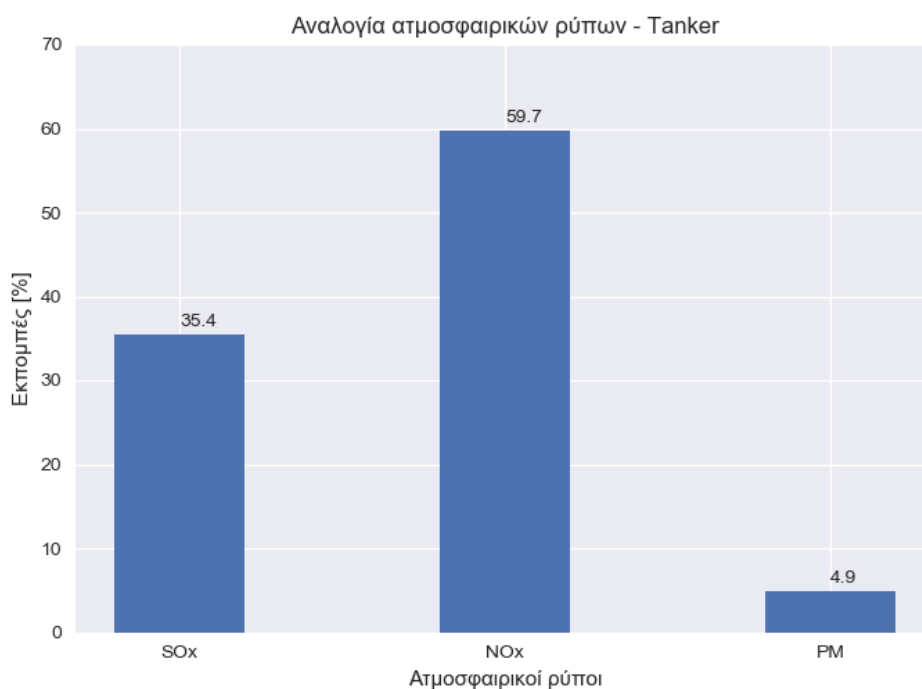
Σχήμα 26:Αναλογία ετήσιων αερίων εκπομπών σε πλοία τύπου Tanker

Σύμφωνα με το ανωτέρω διάγραμμα το 95,4 %, δηλαδή η συντριπτική πλειονότητα των αερίων εκπομπών των πλοίων τύπου Tanker, αφορά το διοξείδιο του άνθρακα. Το υπόλοιπο 4,6 % αφορά τους ατμοσφαιρικούς ρύπους. Σημειώνεται πως όσον αφορά την αναλογία των συνολικών αερίων εκπομπών, η εικόνα που διαμορφώνεται είναι ακριβώς η ίδια με την αντίστοιχη για τα πλοία τύπου Bulk Carrier.

#### ➤ Αναλογία ατμοσφαιρικών ρύπων σε πλοία τύπου Tanker

Η ποσοστιαία συμβολή κάθε ρύπου στην συνολική παραγωγή ατμοσφαιρικών ρύπων για τα πλοία τύπου Tanker του δείγματος αποτυπώνεται στο παρακάτω σχήμα:





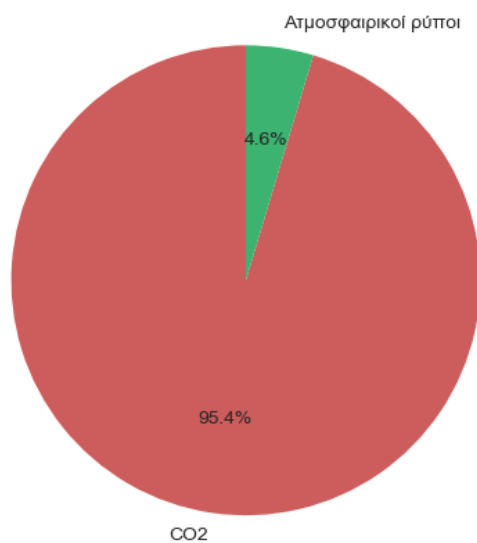
**Σχήμα 27:Αναλογία ετήσιων ατμοσφαιρικών ρύπων σε πλοία τύπου Tanker**

Όπως παρατηρείται, το 59,7% των ατμοσφαιρικών ρύπων από τα πλοία τύπου Tanker του δείγματος αντιστοιχεί σε εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NOx). Ακολουθούν τα οξείδια του θείου (SOx) με ποσοστό 35,4 % και τέλος τα αιωρούμενα σωματίδια (PM) με ποσοστό 4,9%. Η εικόνα αυτή είναι παρόμοια με την αντίστοιχη εικόνα που προέκυψε για τα πλοία τύπου Bulk Carrier του δείγματος.

➤ Αναλογία συνολικών αερίων εκπομπών σε πλοία τύπου Container

Στο γράφημα που ακολουθεί αποτυπώνεται η σύσταση των συνολικών παραγόμενων αερίων εκπομπών από τα πλοία τύπου Container του δείγματος.

### Αναλογία αερίων εκπομπών - Container

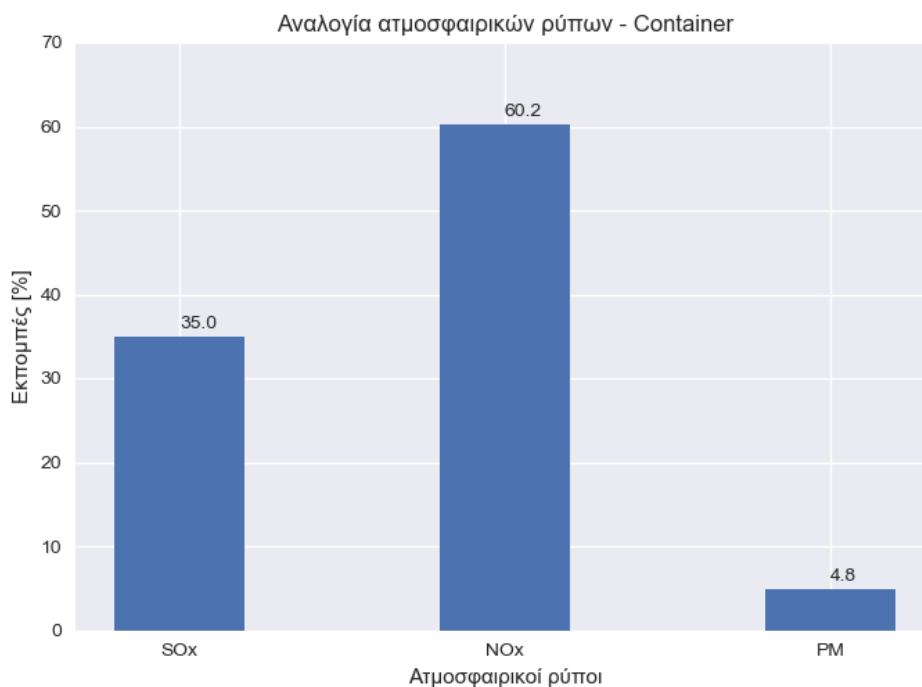


Σχήμα 28:Αναλογία ετήσιων αερίων εκπομπών σε πλοία τύπου Container

Η εικόνα αυτή που διαμορφώνεται είναι όμοια με την αντίστοιχη εικόνα για τα πλοία τύπου Bulk Carrier και Tanker. Το 95,4 % αντιστοιχεί στο διοξείδιο του άνθρακα, ενώ το ποσοστό που αφορά του ατμοσφαιρικούς ρύπους εκτιμάται και πάλι στο 4,6 %.

#### ➤ Αναλογία ατμοσφαιρικών ρύπων σε πλοία τύπου Container

Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει την αναλογία των ατμοσφαιρικών ρύπων που παράγονται από τη λειτουργία των πλοίων τύπου Container του δείγματος:

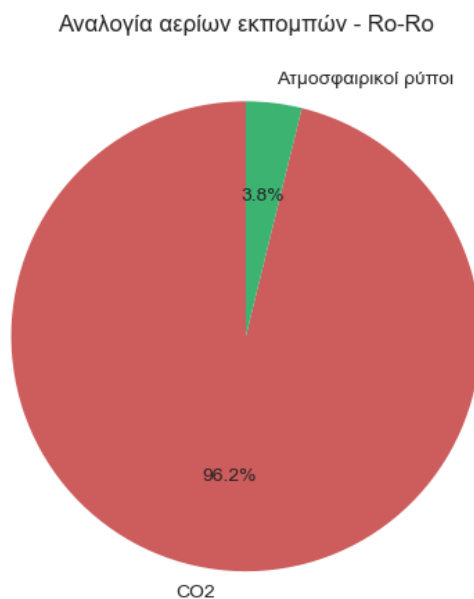


**Σχήμα 29:Αναλογία ετήσιων ατμοσφαιρικών ρύπων σε πλοία τύπου Container**

Από το ανωτέρω σχήμα γίνεται σαφές πως το μεγαλύτερο μέρος των ατμοσφαιρικών ρύπων, σε ποσοστό 60,2 %, των πλοίων τύπου Container αντιστοιχεί σε εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NOx). Δεύτερος ατμοσφαιρικός ρύπος που παράγεται περισσότερο είναι τα οξείδια του θείου (SOx), σε ποσοστό 35 %. Τέλος, η εκπομπή αιωρούμενων σωματιδίων (PM) εκτιμάται ότι ανέρχεται σε ποσοστό 4,8 %. Σημειώνεται πως παρατηρείται μία μικρή αύξηση του ποσοστού των NOx και αντίστοιχη μείωση του ποσοστού των SOx σε σχέση με την αντίστοιχη εικόνα για τα πλοία τύπου Bulk carrier και Tanker.

➤ **Αναλογία συνολικών αερίων εκπομπών σε πλοία τύπου Ro-Ro**

Στο γράφημα που ακολουθεί διαπιστώνεται η ποσοστιαία συμβολή του διοξειδίου του άνθρακα και των ατμοσφαιρικών ρύπων στις συνολικές αέριες εκπομπές από τα πλοία τύπου Ro-Ro του δείγματος.

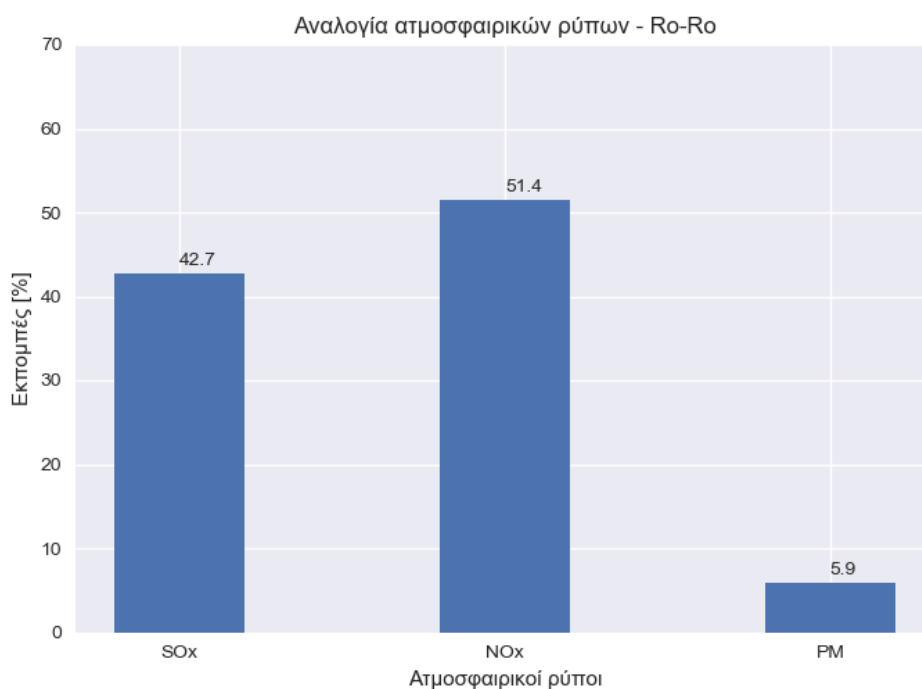


**Σχήμα 30:Αναλογία ετήσιων αερίων εκπομπών σε πλοία τύπου Ro-Ro**

Σύμφωνα με το ανωτέρω διάγραμμα το 96,2 %, δηλαδή η συντριπτική πλειονότητα των αερίων εκπομπών των πλοίων τύπου Ro-Ro, αφορά το διοξείδιο του άνθρακα. Το ποσοστό που αφορά του αέριους ρύπους εκτιμάται μόλις στο 3,8 %. Σημειώνεται πως παρατηρείται μία μικρή αύξηση του ποσοστού του διοξειδίου του άνθρακα εις βάρος του ποσοστού των ατμοσφαιρικών ρύπων σε σχέση με την αντίστοιχη εικόνα για τα πλοία τύπου Bulk Carrier, Tanker και Container.

➤ Αναλογία ατμοσφαιρικών ρύπων σε πλοία τύπου Ro-Ro

Στο διάγραμμα που ακολουθεί απεικονίζεται η ποσοστιαία συμβολή κάθε ατμοσφαιρικού ρύπου στις συνολικές εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων από τα πλοία τύπου Ro-Ro του δείγματος.

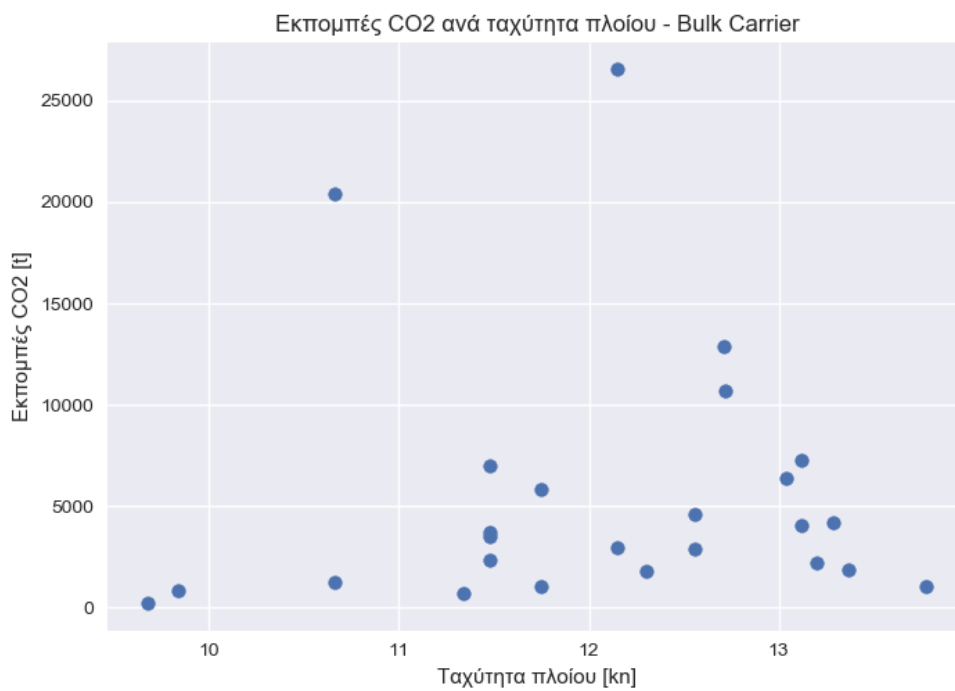


**Σχήμα 31:Αναλογία ετήσιων ατμοσφαιρικών ρύπων σε πλοία τύπου Ro-Ro**

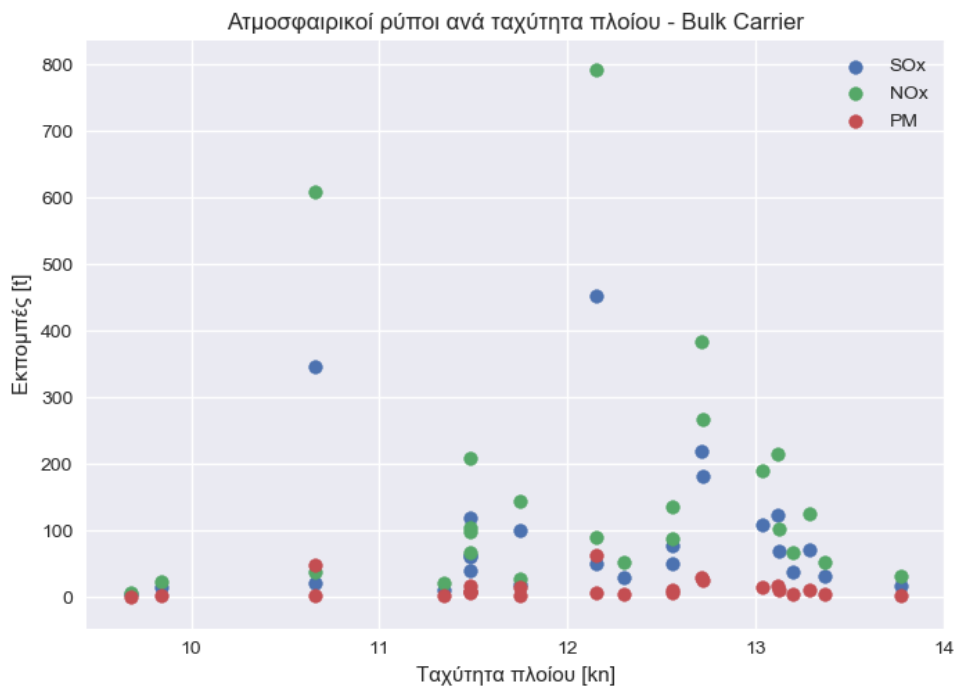
Όπως παρατηρείται, το 51,4 % των ατμοσφαιρικών ρύπων από τα πλοία τύπου Ro-Ro του δείγματος αντιστοιχεί σε εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>), ακολουθούν τα οξείδια του θείου (SO<sub>x</sub>) με ποσοστό 42,7 % και τέλος τα αιωρούμενα σωματίδια (PM) με ποσοστό 5,9 %. Σημειώνεται πως παρατηρείται μία σημαντική μείωση του ποσοστού των NO<sub>x</sub>, μία επίσης σημαντική αύξηση του ποσοστού των SO<sub>x</sub> και μία μικρή αύξηση του ποσοστού των PM σε σχέση με την αντίστοιχη εικόνα για τα πλοία τύπου Bulk Carrier, Tanker και Container.

#### 7.1.5 Ανάλυση αποτελεσμάτων με βάση την ταχύτητα ανά τύπο πλοίου

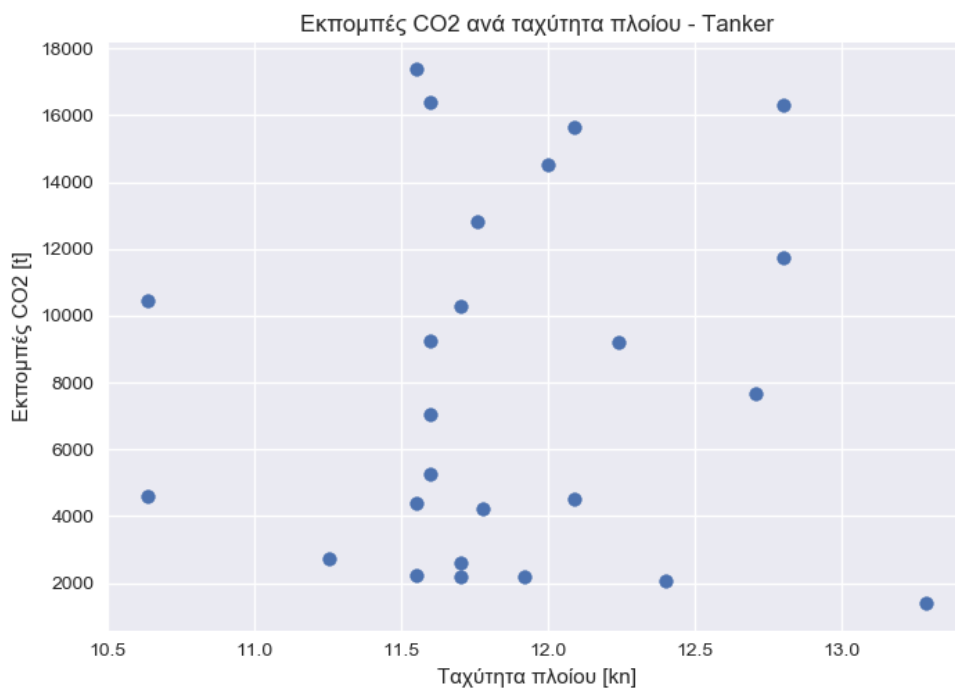
Στην παράγραφο αυτή παρατίθενται διαγράμματα που αποτυπώνουν τις αέριες εκπομπές συναρτήσει της ταχύτητας του πλοίου, για κάθε έναν από τους εξεταζόμενους τύπους πλοίων ξεχωριστά. Κανονικά, αναμένεται τα πλοία με μεγαλύτερη ταχύτητα να οδηγούν σε περισσότερες αέριες εκπομπές. Όμως, όπως διαπιστώνεται στα εν λόγω γραφήματα, στην συγκεκριμένη εφαρμογή δεν προκύπτει κάποια σαφής εικόνα καθώς το τυχαίο δείγμα που επιλέχθηκε αποτελείται από πλοία ποικίλων μεγεθών και απαιτήσεων ισχύος, που επιδρούν καθοριστικά στα αποτελέσματα. Άλλωστε, υπενθυμίζεται πως σκοπός αυτής της εφαρμογής είναι κυρίως η ανάδειξη του συνόλου των δυνατοτήτων του εργαλείου και όχι τόσο η εξαγωγή συμπερασμάτων για αυτό το δείγμα.



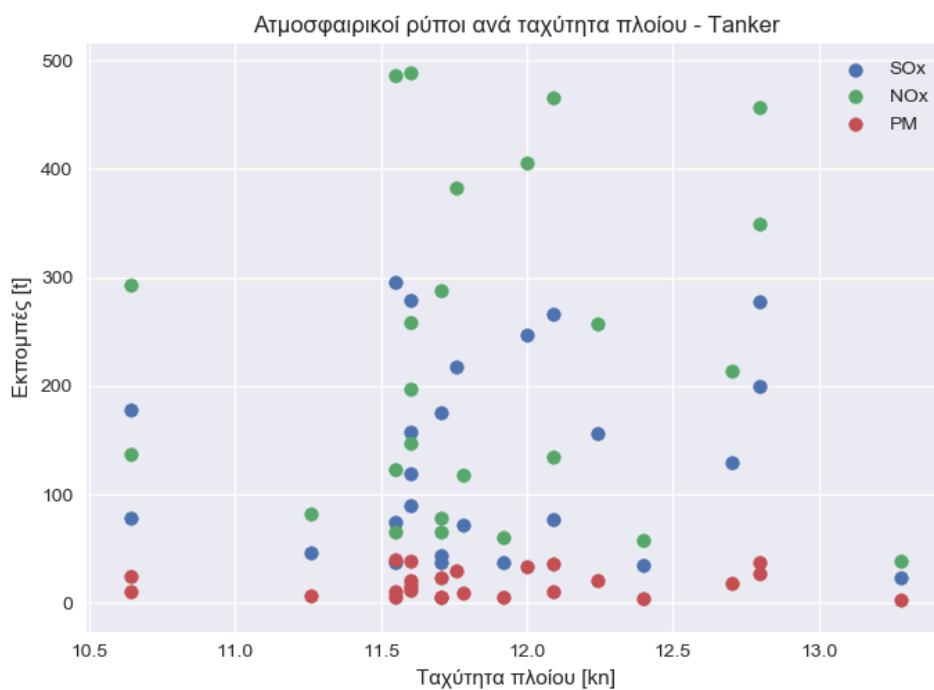
Σχήμα 32:Ετήσιες εκπομπές CO2 συναρτήσει της ταχύτητας για πλοία τύπου Bulk Carrier



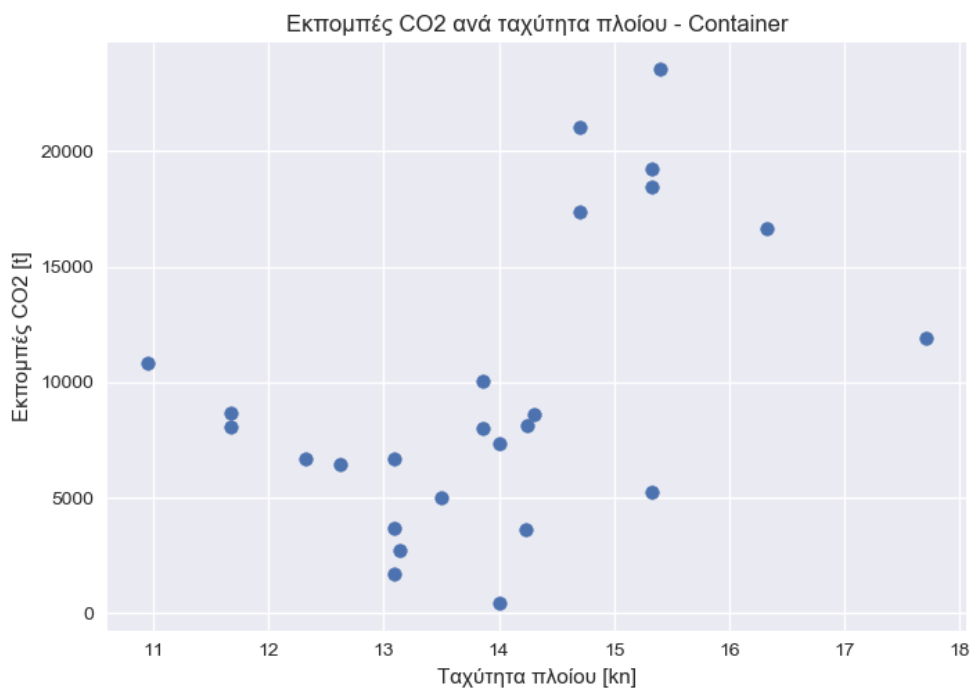
Σχήμα 33:Ετήσιοι ατμοσφαιρικοί ρύποι συναρτήσει της ταχύτητας για πλοία τύπου Bulk Carrier



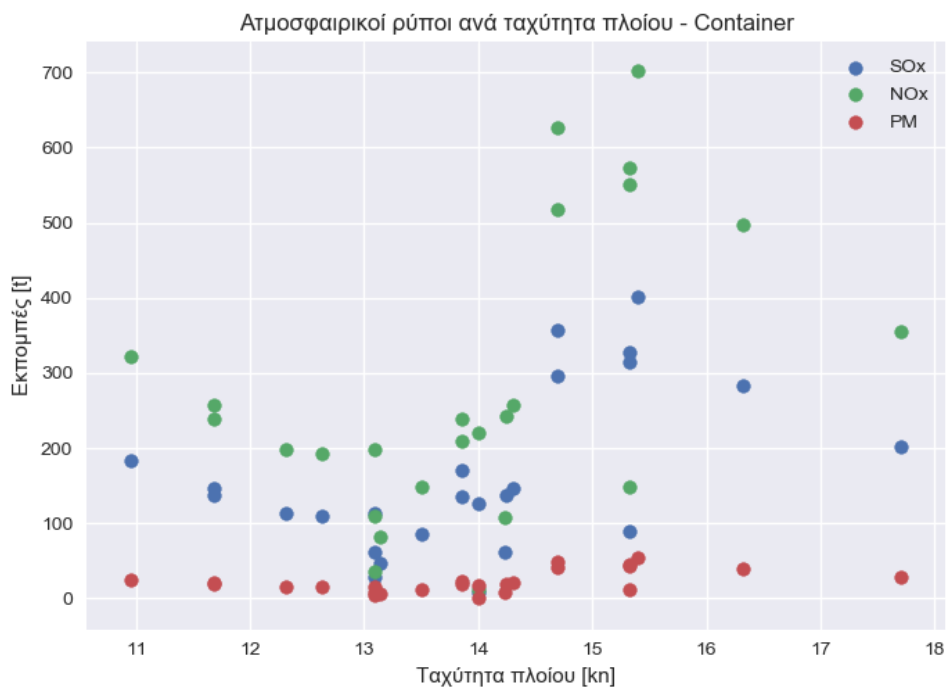
Σχήμα 34: Ετήσιες εκπομπές CO2 συναρτήσει της ταχύτητας για πλοία τύπου Tanker



Σχήμα 35: Ετήσιοι ατμοσφαιρικοί ρύποι συναρτήσει της ταχύτητας για πλοία τύπου Tanker

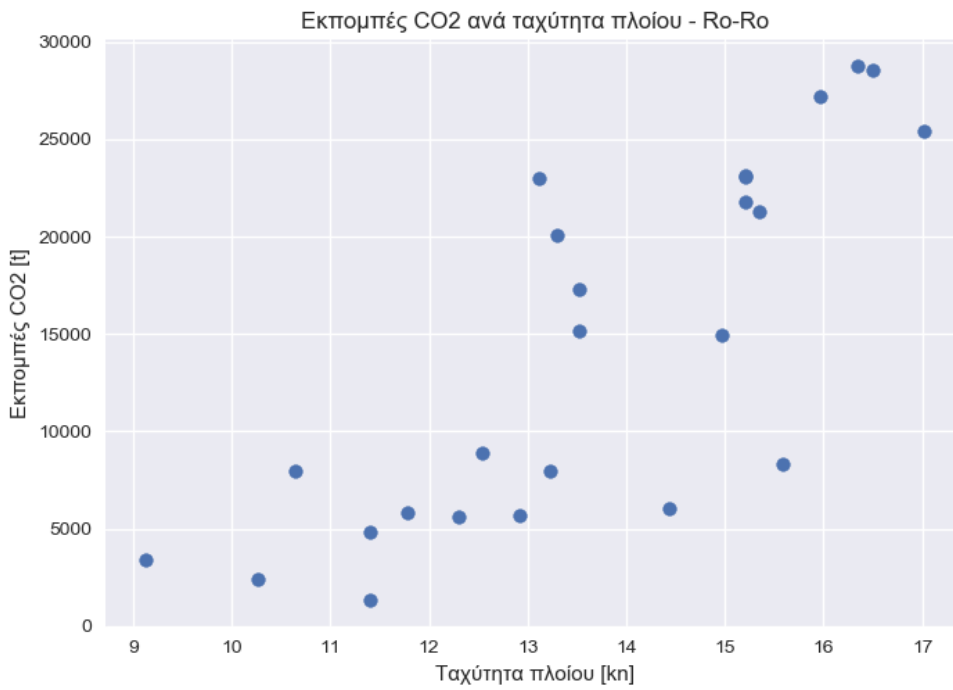


Σχήμα 36:Ετήσιες εκπομπές CO2 συναρτήσει της ταχύτητας για πλοία τύπου Container

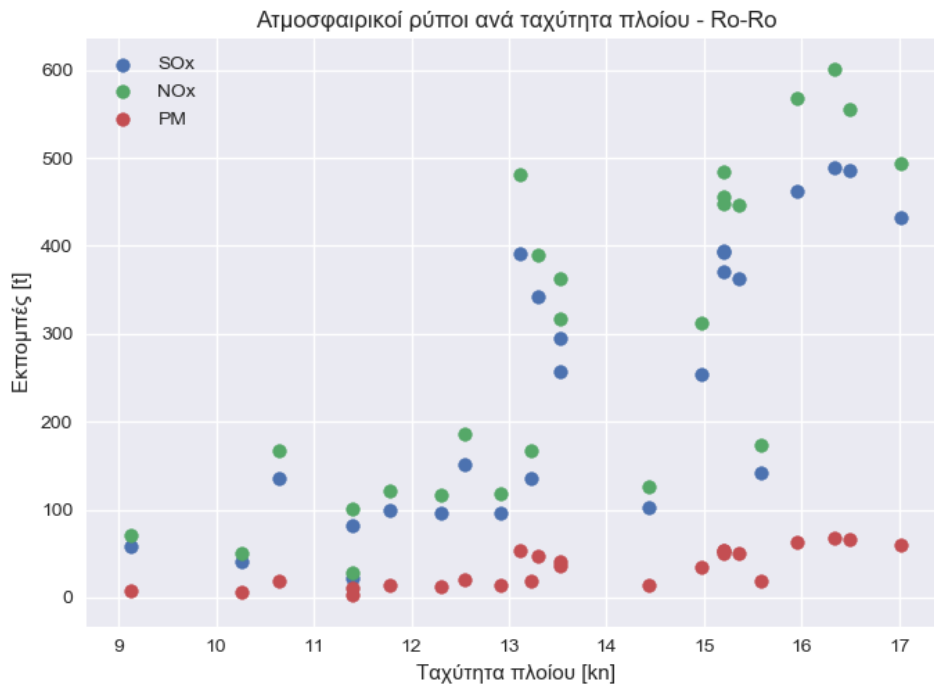


Σχήμα 37:Ετήσιοι ατμοσφαιρικοί ρύποι συναρτήσει της ταχύτητας για πλοία τύπου Container





Σχήμα 38:Ετήσιες εκπομπές CO2 συναρτήσει της ταχύτητας για πλοία τύπου Ro-Ro



Σχήμα 39:Ετήσιοι ατμοσφαιρικοί ρύποι συναρτήσει της ταχύτητας για πλοία τύπου Ro-Ro

## 7.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων ανά τύπο αέριας εκπομπής

Στην παράγραφο αυτή γίνεται ανάλυση των παραγόμενων αερίων εκπομπών, που υπολογίστηκαν από το εργαλείο, ανά τύπο αέριας εκπομπής. Με αυτόν τον τρόπο διαπιστώνεται ποιος συγκεκριμένος τύπος αέριας εκπομπής παράγεται περισσότερο.

### 7.2.1 Αναλογία συνολικών παραγόμενων αερίων εκπομπών

Στο σημείο αυτό έχει ενδιαφέρον να εξεταστεί η συνολική ποσότητα κάθε αέριας εκπομπής ξεχωριστά που παράγεται από το σύνολο των 100 πλοίων του δείγματος. Οι εν λόγω τιμές αναγράφονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 15:Συνολικές ετήσιες εκπομπές ανά τύπο αέριας εκπομπής

Τύπος αέριας εκπομπής	Συνολικές εκπομπές [t]
CO <sub>2</sub>	931040
SO <sub>x</sub>	15846
NO <sub>x</sub>	23961
PM	2177

Ενδεικτικό είναι το ακόλουθο διάγραμμα που παρουσιάζει το ποσοστό των συνολικών εκπομπών αφορά διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και το ποσοστό αφορά ατμοσφαιρικούς ρύπους, δηλαδή SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> και PM.

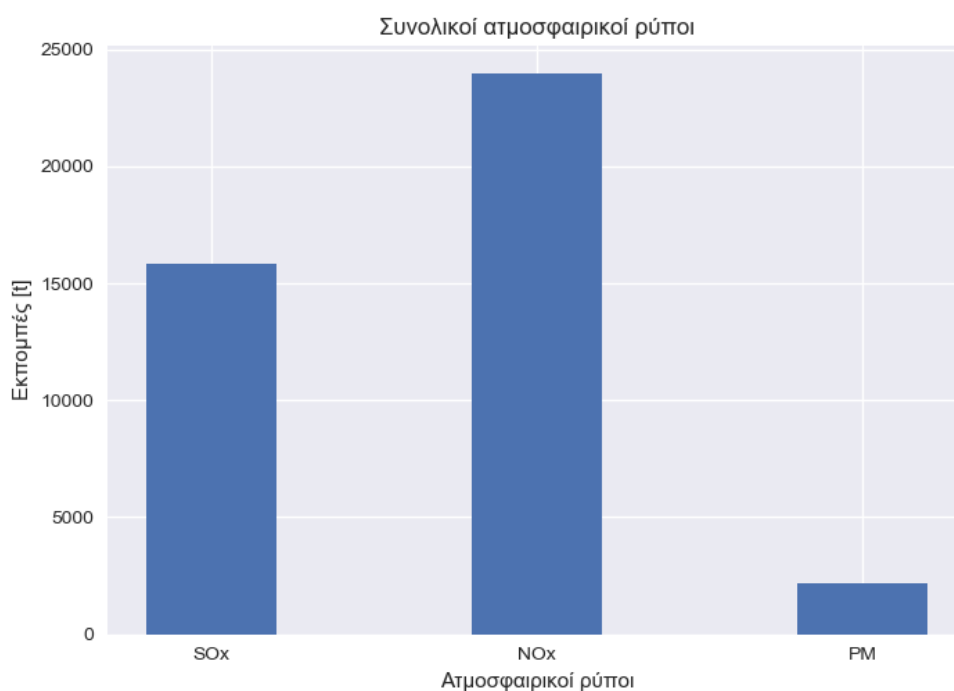


Σχήμα 40:Αναλογία συνολικών ετήσιων αερίων εκπομπών

Σύμφωνα λοιπόν με το ανωτέρω διάγραμμα, το 95,7 % των συνολικών αερίων εκπομπών από το σύνολο των πλοίων του δείγματος αντιστοιχεί σε εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, ενώ μόλις το 4,3 % αντιστοιχεί σε ατμοσφαιρικούς ρύπους.

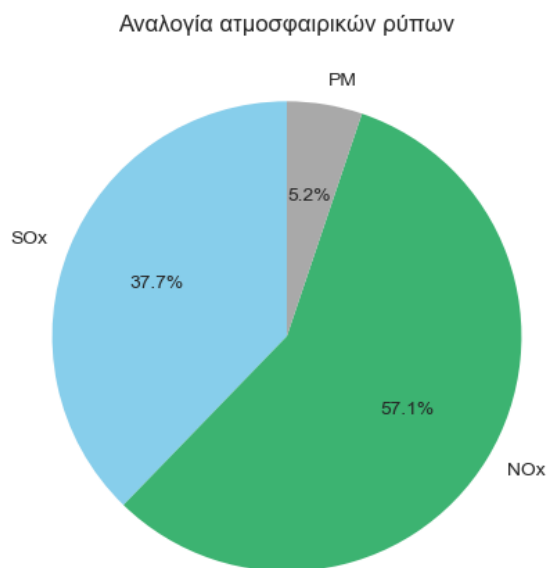
### 7.2.2 Αναλογία συνολικών παραγόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει να εξεταστεί, σύμφωνα πάντα με τα αποτελέσματα του υπολογιστικού εργαλείου, η αναλογία των συνολικών παραγόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων, δηλαδή ποιος συγκεκριμένος ατμοσφαιρικός ρύπος παράγεται περισσότερο από το σύνολο των πλοίων. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί, η μεγαλύτερη ποσότητα παραγόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων αντιστοιχεί σε οξείδια του αζώτου (NOx). Δεύτερος ρύπος που παράγεται περισσότερο είναι τα οξείδια του θείου (SOx) ενώ τελευταία ακολουθούν τα αιωρούμενα σωματίδια (PM).



**Σχήμα 41:Ετήσιες εκπομπές κάθε ατμοσφαιρικού ρύπου**

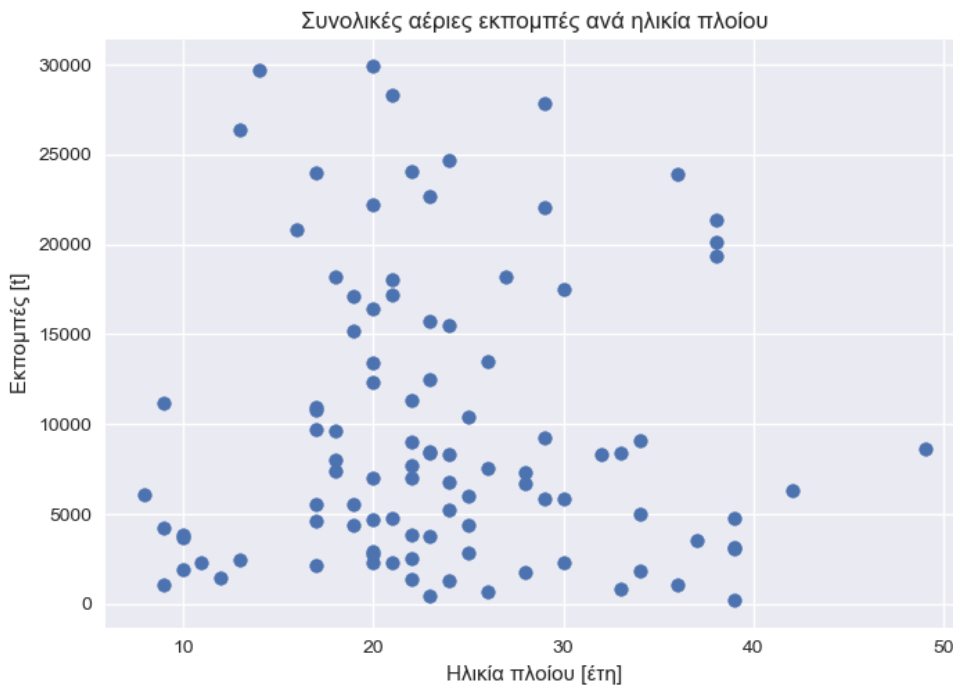
Τέλος, η ποσοστιαία συμβολή κάθε συγκεκριμένου ατμοσφαιρικού ρύπου στη συνολική παραγωγή ατμοσφαιρικών ρύπων παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα:



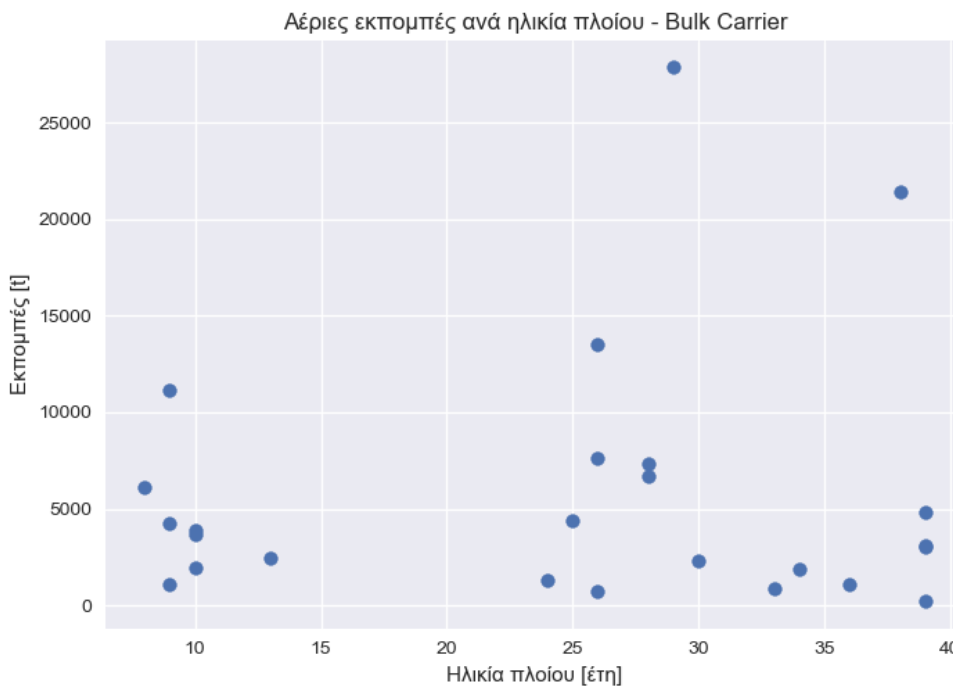
**Σχήμα 42: Ποσοστιαία συμβολή κάθε ρύπου στη συνολική παραγωγή ετήσιων ατμοσφαιρικών ρύπων**

### 7.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων με βάση την ηλικία του πλοίου

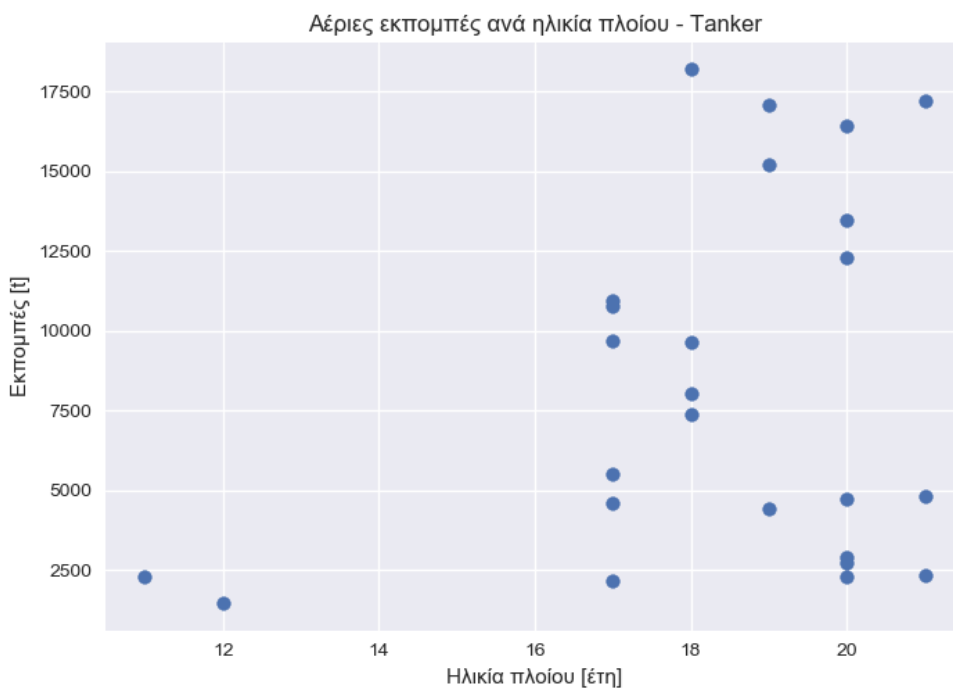
Μία ακόμη ενδιαφέρουσα ανάλυση αποτελεί η εξέταση των συνολικών αερίων εκπομπών συναρτήσει της ηλικίας των πλοίων. Κανονικά, αναμένεται νεότερα πλοία με κινητήρες νεότερης τεχνολογίας να είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον. Όμως, όπως και στην περίπτωση της ανάλυσης με βάση την ταχύτητα των πλοίων, στη συγκεκριμένη εφαρμογή δεν διαμορφώνεται κάποια σαφής εικόνα, λόγω του τυχαίου δείγματος των πλοίων με ποικίλα χαρακτηριστικά, όπως η ισχύς και η ταχύτητα, που επιδρούν καθοριστικά στα αποτελέσματα. Μέσω των παρακάτω γραφημάτων, όμως, αναδεικνύεται η δυνατότητα του υπολογιστικού εργαλείου να παρέχει αυτού του είδους την ανάλυση.



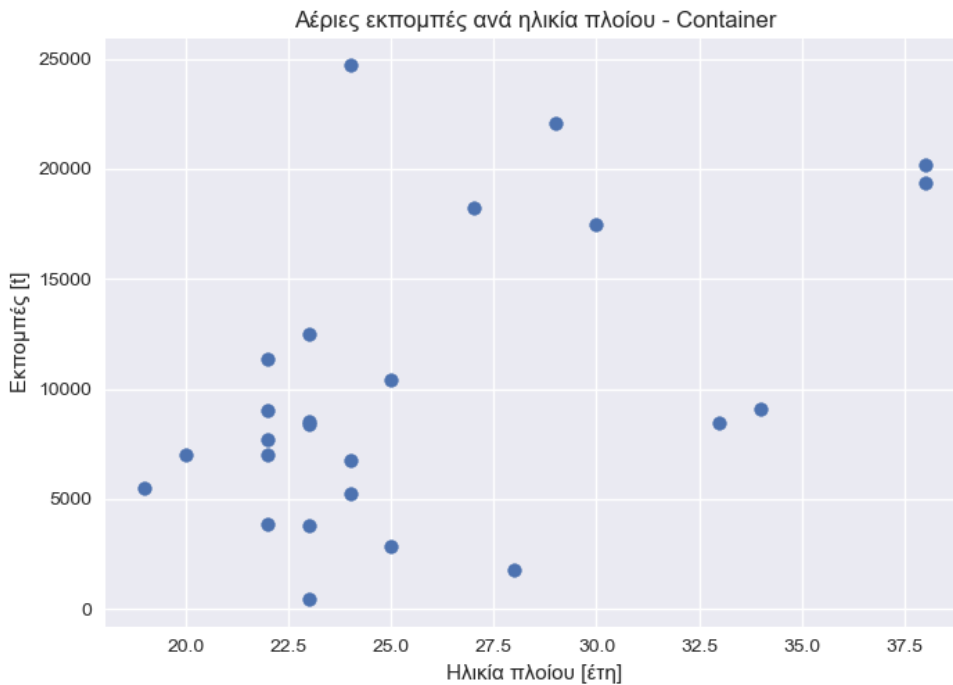
Σχήμα 43:Ετήσιες αέριες εκπομπές συναρτήσεϊ της ηλικίας των πλοίων



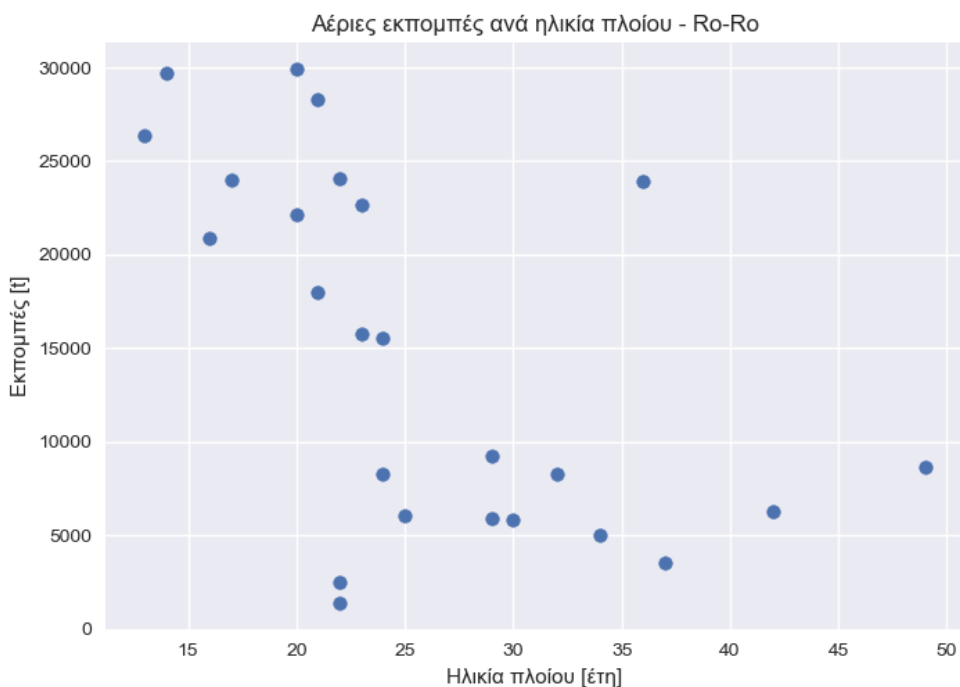
Σχήμα 44:Ετήσιες αέριες εκπομπές συναρτήσεϊ της ηλικίας των πλοίων για πλοία τύπου Bulk Carrier



Σχήμα 45:Ετήσιες αέριες εκπομπές συναρτήσει της ηλικίας των πλοίων για πλοία τύπου Tanker



Σχήμα 46:Ετήσιες αέριες εκπομπές συναρτήσει της ηλικίας των πλοίων για πλοία τύπου Container



Σχήμα 47:Ετήσιες αέριες εκπομπές συναρτήσει της ηλικίας των πλοίων για πλοία τύπου Ro-Ro

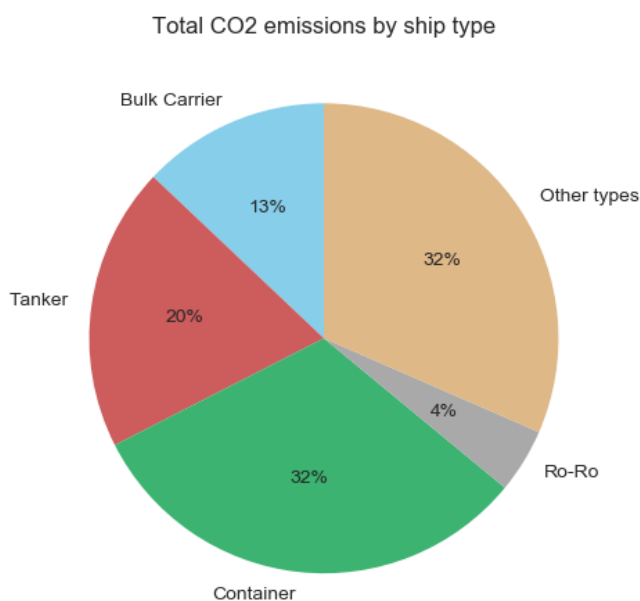
#### 7.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων με αντίστοιχα άλλων ερευνών

Όπως έχει τονιστεί, σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι κυρίως η παρουσίαση των αποτελεσμάτων και των αναλύσεων που παρέχει το υπολογιστικό εργαλείο και όχι τόσο η εξαγωγή των συμπερασμάτων από το συγκεκριμένο δείγμα πλοίων. Εντούτοις, ενδιαφέρον έχει να διαπιστωθεί εάν η εικόνα που τελικά διαμορφώθηκε από τη συγκεκριμένη εφαρμογή προκύπτει και από άλλες έρευνες που έχουν δημοσιευθεί. Αυτό είναι και το θέμα της τελευταίας παραγράφου του παρόντος κεφαλαίου.

##### 7.4.1 Συνολικές εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά τύπο πλοίου

Υπενθυμίζεται πως με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου, τις περισσότερες εκπομπές CO<sub>2</sub> παράγουν τα πλοία τύπου Ro-Ro και ακολουθούν κατά σειρά τα πλοία τύπου Container, Tanker και Bulk Carrier.

Σύμφωνα με τα στοιχεία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής από τις εγγραφές του MRV, τα αποτελέσματα για την ποσοστιαία συμβολή των συγκεκριμένων τύπων πλοίων στη συνολική παραγωγή των εκπομπών CO<sub>2</sub> είναι τα ακόλουθα:

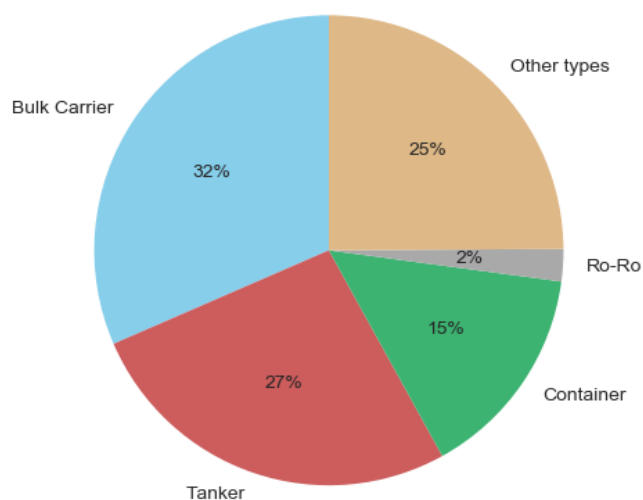


**Σχήμα 48:** Ποσοστιαία συμβολή κάθε τύπου πλοίου στις ετήσιες εκπομπές CO<sub>2</sub>, σύμφωνα με τον MRV

Λαμβάνοντας υπόψη το ανωτέρω διάγραμμα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα του MRV επιβεβαιώνουν τα αντίστοιχα αποτελέσματα του υπολογιστικού εργαλείου όσον αφορά τις παραγόμενες αέριες εκπομπές από πλοία τύπου Bulk Carrier, Tanker και Container. Τα μόνα αποτελέσματα που φαίνεται να παρουσιάζουν σημαντική διαφορά είναι εκείνα που αφορούν τα πλοία τύπου Ro-Ro. Τα αποτελέσματα του υπολογιστικού εργαλείου έδειξαν ότι ο συγκεκριμένος τύπος πλοίου παράγει τις περισσότερες εκπομπές CO<sub>2</sub>, ενώ τα αποτελέσματα του MRV δείχνουν ότι η συμβολή του τύπου αυτού στις συνολικές εκπομπές CO<sub>2</sub> είναι πολύ μικρή. Εντούτοις, υπάρχει εξήγηση για αυτή την απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο εργαλείων. Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας, το δείγμα των πλοίων που χρησιμοποιήθηκε στην εφαρμογή χαρακτηρίζεται από συμβολή κατά 25% κάθε τύπου πλοίου στον συνολικό αριθμό των πλοίων του δείγματος. Αντιθέτως, το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε από τον MRV παρουσιάζει την ακόλουθη αναλογία, όσον αφορά τον αριθμό των πλοίων ανά τύπο πλοίου:



Distribution of number of ships by ship type



Σχήμα 49: Συμβολή κάθε τύπου πλοίου στον αριθμό των πλοίων του δείγματος του MRV

Από το παραπάνω διάγραμμα γίνεται σαφές ότι για τα πολύ χαμηλά ποσοστά εκπομπών CO<sub>2</sub> από πλοία τύπου Ro-Ro που προκύπτουν από τον MRV, ευθύνεται η πολύ μικρή συμμετοχή τους στο δείγμα. Επομένως, τα αποτελέσματα των δύο εργαλείων δεν μπορούν να θεωρηθούν αντικρουόμενα όσον αφορά τον συγκεκριμένο τύπο πλοίου. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι τα πλοία τύπου Ro-Ro χαρακτηρίζονται από μεγάλη παραγωγή εκπομπών CO<sub>2</sub>, όμως η πολύ μικρότερη κυκλοφορία αυτού του τύπου πλοίων συγκριτικά με τους υπόλοιπους είναι ο λόγος που δεν τον καθιστά μία από τις κύριες «απειλές» για το περιβάλλον. Από την άλλη πλευρά, το ανωτέρω διάγραμμα έρχεται να επιβεβαιώσει τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων σχετικά με τους υπόλοιπους τύπους πλοίων. Συγκεκριμένα, παρατηρείται πως τα πλοία τύπου Bulk Carrier έχουν τη μεγαλύτερη συμμετοχή στο δείγμα αλλά εμφανίζουν τις λιγότερες παραγόμενες εκπομπές CO<sub>2</sub>. Συνεπώς, επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα του υπολογιστικού εργαλείου ότι τα πλοία τύπου Bulk Carrier είναι αυτά που επιβαρύνουν λιγότερο το περιβάλλον. Επιπλέον, παρατηρείται πως τα πλοία τύπου Container έχουν τη μικρότερη συμμετοχή στο δείγμα, σχετικά πάντα με τους άλλους τρεις εξεταζόμενους τύπους πλοίων, αλλά χαρακτηρίζονται από τη μεγαλύτερη παραγωγή εκπομπών CO<sub>2</sub>. Επομένως, η εικόνα που διαμορφώνεται από την εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου και παρουσιάζει τα πλοία τύπου Container ως μία από τις κυριότερες πηγές εκπομπών CO<sub>2</sub> επαληθεύεται από τα στοιχεία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής μέσω του MRV. Τέλος, τα πλοία τύπου Tanker έχουν μικρότερη συμμετοχή στο δείγμα από τα πλοία τύπου Bulk Carrier αλλά παράγουν μεγαλύτερη ποσότητα CO<sub>2</sub> από αυτά. Επίσης, έχουν μεγαλύτερη συμμετοχή στο δείγμα από πλοία τύπου Container αλλά παράγουν μικρότερη ποσότητα εκπομπών CO<sub>2</sub> από αυτά. Επομένως, η δημοσίευση των εγγραφών του MRV επιβεβαιώνει το συμπέρασμα από την εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου, ότι τα πλοία τύπου Tanker αποτελούν μία από τις κύριες πηγές CO<sub>2</sub> μετά τα Containers. Συνεπώς, επαληθεύουν την εικόνα που δημιουργήθηκε από το υπολογιστικό εργαλείο για τους εξεταζόμενους τύπους πλοίων πλην του Ro-Ro, σύμφωνα με την οποία τα πλοία που επιβαρύνουν περισσότερο το περιβάλλον είναι εκείνα τύπου Container, ακολουθούν εκείνα τύπου Tanker και τέλος εκείνα τύπου Bulk Carrier.

#### 7.4.2 Αναλογία συνολικών παραγόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων

Υπενθυμίζεται πως με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου, η μεγαλύτερη ποσότητα ατμοσφαιρικών ρύπων αφορά τα οξειδία του αζώτου (NO<sub>x</sub>), ακολουθούν τα οξειδία του θείου (SO<sub>x</sub>) και τέλος τα αιωρούμενα σωματίδια (PM).

Σύμφωνα με δημοσιευμένα στοιχεία από τον IMO (IMO, 2014) και το ICCT (ICCT, 2017), τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την αναλογία των συνολικών παραγόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων έχουν ως εξής:

Πίνακας 16: Αναλογία συνολικών παραγόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων ανά έτος. Πηγή: ICCT, 2017

Pollutant and Source	Third IMO GHG Study						ICCT		
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>NO<sub>x</sub> (kilotonnes, kt)</b>	<b>22,801</b>	<b>23,639</b>	<b>20,756</b>	<b>18,756</b>	<b>20,310</b>	<b>19,002</b>	<b>18,426</b>	<b>18,398</b>	<b>19,062</b>
International	19,943	20,759	19,104	16,708	18,047	16,997	16,941	16,818	17,058
Domestic	1,564	1,639	930	1,114	1,323	1,171	1,030	1,093	1,238
Fishing	1,294	1,242	722	935	940	834	455	487	766
<b>SO<sub>x</sub> (kt)</b>	<b>11,581</b>	<b>11,892</b>	<b>11,646</b>	<b>10,550</b>	<b>11,632</b>	<b>10,240</b>	<b>10,355</b>	<b>10,361</b>	<b>10,457</b>
International	10,771	11,041	11,164	9,895	10,851	9,712	128.3	136.7	122.5
Domestic	278	331	202	251	358	268	90.9	94.1	95.4
Fishing	533	521	280	405	423	261	10574.3	10592.1	10674.6
<b>PM (kt)</b>	<b>1,622</b>	<b>1,679</b>	<b>1,574</b>	<b>1,432</b>	<b>1,563</b>	<b>1,402</b>	<b>1,475</b>	<b>1,504</b>	<b>1,492</b>
International	1,493	1,545	1,500	1,332	1,446	1,317	1,426	1,452	1,441
Domestic	51	58	33	41	56	44	30	32	31
Fishing	78	76	41	59	61	41	18	19	20

Στον ανωτέρω πίνακα παρουσιάζεται η αναλογία των συνολικών παραγόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων για τα έτη από το 2007 έως το 2015 από όλους τους τύπους πλοίων σε παγκόσμιο επίπεδο. Υπενθυμίζεται πως το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή στην παρούσα εργασία αφορά το έτος 2018 για τέσσερις εξεταζόμενους τύπους πλοίων που κινήθηκαν από ή/και προς λιμάνια του Ευρωπαϊκού Οικονομικού Χώρου (European Economic Area, EEA). Από τον ανωτέρω πίνακα, λοιπόν, προκύπτει πως σε ό,τι αφορά την αναλογία των συνολικών παραγόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων, τα αποτελέσματα της εφαρμογής του υπολογιστικού εργαλείου συμφωνούν με τη συνολική εικόνα που προκύπτει από τις αντίστοιχες δημοσιεύσεις σε παγκόσμιο επίπεδο.

## 8. Εφαρμογή με χρήση στοιχείων από βάσεις δεδομένων

Το προηγούμενο κεφάλαιο επικεντρώθηκε στην ανάλυση των δυνατοτήτων του υπολογιστικού εργαλείου, με την παρουσίαση όλων των αποτελεσμάτων και των αναλύσεων που παρέχει για ένα οποιοδήποτε δείγμα πλοίων. Αυτό το κεφάλαιο εστιάζει στη δυνατότητα του υπολογιστικού εργαλείου να αξιοποιεί στοιχεία από βάσεις δεδομένων, όπως το δορυφορικό σύστημα AIS, προκειμένου να υπολογίσει τις αέριες εκπομπές από τη λειτουργία ενός ή περισσότερων πλοίων. Για τον λόγο αυτό παρουσιάζεται μία εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου κατά την οποία όλα τα δεδομένα αντλήθηκαν από την ιστοσελίδα [marinetraffic.com](http://marinetraffic.com), στην οποία παρατίθενται σε πραγματικό χρόνο οι δορυφορικές καταγραφές του AIS. Συγκεκριμένα, τα εν λόγω δεδομένα αφορούν την καταγραφή της κίνησης ενός πλοίου τύπου Bulk Carrier στην Βαλτική Θάλασσα για 24 ώρες.

Η συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ιδιαίτερα σημαντική κυρίως για δύο λόγους. Ο πρώτος αφορά την ίδια τη διαδικασία της εφαρμογής, καθώς αναδεικνύει τη δυνατότητα του εργαλείου να αξιοποιεί στοιχεία από βάσεις δεδομένων που ενημερώνονται σε πραγματικό χρόνο, όπως η ιστοσελίδα [marinetraffic.com](http://marinetraffic.com) μέσω του δορυφορικού συστήματος AIS. Μάλιστα, αυτό αποτελεί ένα σημαντικό βήμα προκειμένου, στα πλαίσια περαιτέρω ανάπτυξης του υπολογιστικού εργαλείου στο μέλλον, να επιτευχθεί η δυνατότητα απευθείας σύνδεσής του με τέτοιες βάσεις δεδομένων, χωρίς να απαιτείται η ενδιάμεση δημιουργία ενός αρχείου excel όπως έχει περιγραφεί. Ο δεύτερος λόγος αφορά το γεγονός πως σε αυτή την περίπτωση είναι διαθέσιμα όλα τα πραγματικά δεδομένα, χωρίς να χρειάζεται η λήψη στοιχείων από το υποστηρικτικό αρχείο. Συγκεκριμένα, σε αντίθεση με την εφαρμογή του προηγούμενου κεφαλαίου, εδώ δεν χρειάζεται να γίνουν οι παραδοχές για τον εναλλακτικό υπολογισμό της πραγματικής ταχύτητας και του πραγματικού βυθίσματος, αφού λαμβάνονται ως δεδομένα οι πραγματικές καταγραφές του AIS. Επομένως, γίνεται εμφανής η δυνατότητα του εργαλείου να παράγει αποτελέσματα μεγάλης ακρίβειας.

### 8.1 Αποτελέσματα εφαρμογής

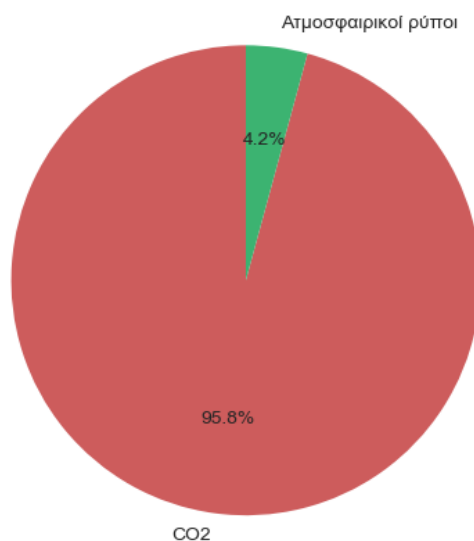
Αρχικά, το υπολογιστικό εργαλείο διαμόρφωσε τον ακόλουθο πίνακα με τις αναλυτικές αέριες εκπομπές του υπό εξέταση πλοίου:

Πίνακας 17: Αναλυτικές αέριες εκπομπές πλοίου

Τύπος αέριας εκπομπής	Συνολικές εκπομπές [t]
CO <sub>2</sub>	83,94
SO <sub>x</sub>	1,43
NO <sub>x</sub>	2,09
PM	0,20

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η αναλογία των συνολικών αερίων εκπομπών από τη λειτουργία του πλοίου:

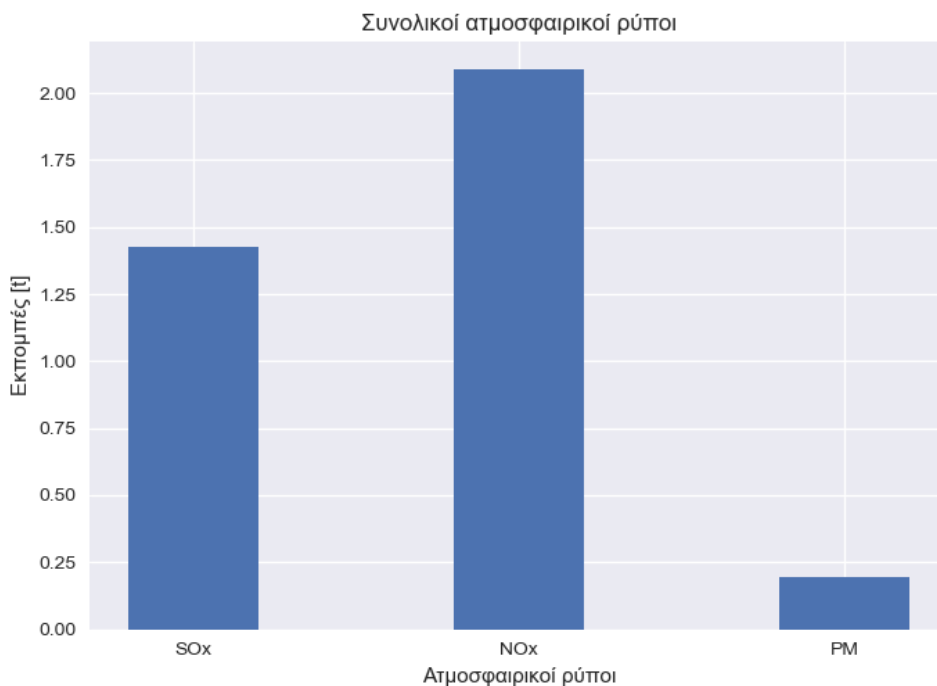
### Αναλογία συνολικών αερίων εκπομπών



Σχήμα 50: Αναλογία συνολικών αερίων εκπομπών

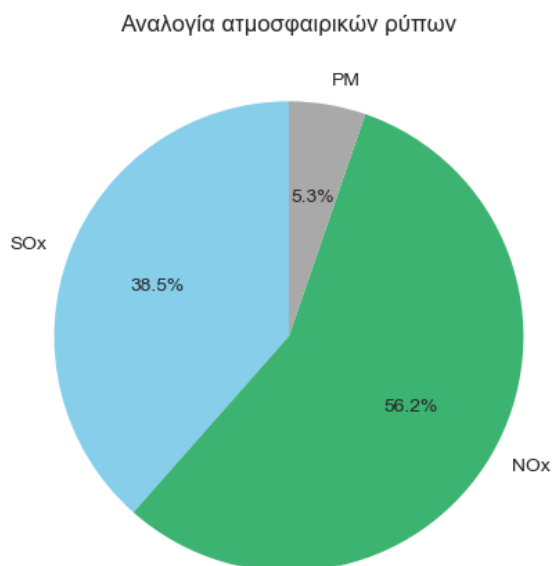
Στο ανωτέρω σχήμα παρατηρείται πως η συντριπτική πλειονότητα των αερίων εκπομπών αφορά το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), με ποσοστό 95,8%. Το υπόλοιπο 4,2% αφορά εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων, δηλαδή οξειδίων του θείου (SO<sub>x</sub>), οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και αιωρούμενων σωματιδίων (PM).

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται οι συνολικές εκπομπές κάθε ατμοσφαιρικού ρύπου:



Σχήμα 51: Συνολικές εκπομπές κάθε ατμοσφαιρικού ρύπου

Στο ακόλουθο σχήμα αποτυπώνεται η ποσοστιαία συμβολή κάθε ατμοσφαιρικού ρύπου στις συνολικές εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων.



Σχήμα 52:Αναλογία ατμοσφαιρικών ρύπων

Όπως παρατηρείται στα παραπάνω δύο σχήματα, το μεγαλύτερο μέρος ατμοσφαιρικών ρύπων αφορά τις εκπομπές NOx, ακολουθούν τα SOx, ενώ πολύ λιγότερες είναι οι εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων (PM).

Αξίζει να σημειωθεί πως η εικόνα για τις αέριες εκπομπές που προέκυψε από τη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι σύμφωνη με την αντίστοιχη εικόνα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο για το δείγμα των 100 πλοίων.

## 9. Συμπεράσματα

Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι για τον υπολογισμό των αερίων εκπομπών από τη λειτουργία των πλοίων, η Top-down και η Bottom-up ή Activity-based. Η μέθοδος Top-down υπολογίζει τις συνολικές παγκόσμιες αέριες εκπομπές με βάση στοιχεία για την παγκόσμια κατανάλωση καυσίμου και εν συνεχεία τα αποτελέσματά της αποδίδονται σε κάθε πλοίο. Η μέθοδος Bottom-up ή Activity-based υπολογίζει τις αέριες εκπομπές ενός μεμονωμένου πλοίου, λαμβάνοντας υπόψη ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά του. Εν συνεχεία, αθροίζοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν για κάθε πλοίο, διαμορφώνεται η εικόνα για έναν στόλο ή μία ολόκληρη γεωγραφική περιοχή. Γενικά, προτιμάται η μέθοδος Bottom-up, η οποία θεωρείται πως οδηγεί σε πιο ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα. Ύστερα από την απαραίτητη συγκριτική ανάλυση, η μέθοδος Bottom-up ή Activity-based είναι εκείνη που επιλέγεται για την κατασκευή του υπολογιστικού εργαλείου στην παρούσα εργασία.

Λαμβάνοντας υπόψη τη λειτουργία μόνο της κύριας μηχανής του πλοίου, όπως στην παρούσα εργασία, οι βασικές παράμετροι της μεθόδου Bottom-up ή Activity-based είναι ο συνολικός χρόνος στη θάλασσα, η ισχύς της κύριας μηχανής, ο Load Factor (LF) που εκφράζει τον λόγο της πραγματικής ισχύος προς την ονομαστική ισχύ του κινητήρα και ο Emission Factor (EF) που εκφράζει την ποσότητα της παραγόμενης αέριας εκπομπής ανά ποσότητα χρησιμοποιούμενου καυσίμου. Με βάση τον τρόπο υπολογισμού της πραγματικής ισχύος του κινητήρα και άρα του Load Factor (LF), διαμορφώνονται τέσσερις παραλλαγές της μεθόδου Bottom-up. Από αυτές, η εκδοχή του IMO είναι εκείνη που λαμβάνει υπόψη περισσότερες και πιο λεπτομερείς παραμέτρους για τον υπολογισμό των αερίων εκπομπών, όπως η επίδραση του καιρού και της ρύπανσης της γάστρας στην πρόωση. Από την άλλη, στην εκδοχή της MAN προτείνεται η σχέση ισχύος κινητήρα - ταχύτητας πλοίου να θεωρείται διαφορετική για κάθε τύπο πλοίου και όχι κυβική για όλα τα πλοία όπως σε εκείνη του IMO. Τελικά, στην παρούσα εργασία υιοθετείται η πρόταση μίας ενδιαφέρουσας δημοσίευσης από τη σχετική βιβλιογραφία (Moreno-Gutierrez, Rajago- Velazquez et al., 2018) για τη μέθοδο υπολογισμού των αερίων εκπομπών από τα πλοία. Σύμφωνα με την εν λόγω δημοσίευση, η καταλληλότερη μέθοδος είναι η εκδοχή του IMO χρησιμοποιώντας όμως τους συντελεστές που προτείνει η MAN για τη σχέση ισχύος κινητήρα - ταχύτητας πλοίου για κάθε τύπο πλοίου. Αυτή η συνδυαστική μέθοδος είναι λοιπόν εκείνη που αποτελεί τη βάση για την ανάπτυξη του κώδικα στη γλώσσα προγραμματισμού Python, με σκοπό την κατασκευή του υπολογιστικού εργαλείου για τον αναλυτικό υπολογισμό των αερίων εκπομπών από τη λειτουργία των πλοίων.

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι παραγόμενες αέριες εκπομπές από τα πλοία κατά την πλεύση τους στην ανοικτή θάλασσα, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η λειτουργία των βοηθητικών μηχανών. Με βάση το μαθηματικό μοντέλο που αντιστοιχεί στη μέθοδο που επιλέχθηκε και σύμφωνα με τον κώδικα που αναπτύχθηκε, ως δεδομένα εισόδου για την χρήση του υπολογιστικού εργαλείου απαιτούνται ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά του πλοίου. Αυτά είναι ο τύπος του πλοίου, η χωρητικότητά του, το βύθισμα σχεδίασης, η ταχύτητα υπηρεσίας, η ισχύς και οι στροφές της κύριας μηχανής, το χρησιμοποιούμενο καύσιμο, ο συνολικός χρόνος στη θάλασσα, η συνολική διανυόμενη απόσταση, η πραγματική ταχύτητα και το πραγματικό βύθισμα, το μήκος και η ηλικία του πλοίου.

Το υπολογιστικό εργαλείο «διαβάζει» ένα αρχείο excel με τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου. Σε περίπτωση έλλειψης δεδομένων, έχει δημιουργηθεί ένα υποστηρικτικό αρχείο excel ώστε οι τιμές που λείπουν να λαμβάνονται από αυτό. Συγκεκριμένα, το υπολογιστικό εργαλείο προβλέπει δύο περιπτώσεις: να μην είναι διαθέσιμο κανένα από τα βασικά

χαρακτηριστικά ενός πλοίου ή να μην είναι διαθέσιμη κάποια από τις δορυφορικές καταγραφές σχετικά με την κίνηση ενός πλοίου, δηλαδή η πραγματική ταχύτητα, το πραγματικό βύθισμα, ο χρόνος στη θάλασσα και η διανυόμενη απόσταση.

Το υπολογιστικό εργαλείο υλοποιεί τους κατάλληλους υπολογισμούς και εν τέλει παράγει ένα νέο αρχείο excel με τις αέριες εκπομπές κάθε πλοίου, ειδικούς πίνακες και κατάλληλα διαμορφωμένα διαγράμματα με αναλύσεις των αποτελεσμάτων ανά τύπο πλοίου, ανά τύπο αέριας εκπομπής καθώς και με βάση την ταχύτητα και την ηλικία των πλοίων.

Σε μία πρώτη εφαρμογή σχετικά με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τριών εκδοχών της Bottom-up και του υπολογιστικού εργαλείου με τις αντίστοιχες εγγραφές του MRV, διαπιστώθηκε πως σε επίπεδο συνολικών εκπομπών CO<sub>2</sub> υπάρχουν μικρές αποκλίσεις. Όμως, σε όλες τις μεθόδους προέκυψαν πλοία με αρκετά μεγάλη απόκλιση από τον MRV. Οι αποκλίσεις αυτές ενδεχομένως οφείλονται στην έλλειψη στοιχείων για την πραγματική ταχύτητα και το πραγματικό βύθισμα στην εν λόγω εφαρμογή αλλά και στο γεγονός πως στον MRV χρησιμοποιείται διαφορετική μέθοδος υπολογισμού των εκπομπών CO<sub>2</sub>.

Πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας του υπολογιστικού εργαλείου, δηλαδή εξετάστηκε πόσο μεταβάλλει τα τελικά αποτελέσματα των αερίων εκπομπών η μεταβολή κάθε μίας μεμονωμένης μεταβλητής του συστήματος. Τη μεγαλύτερη επίδραση στα αποτελέσματα του υπολογιστικού εργαλείου, με μεγάλη διαφορά από τις υπόλοιπες, έχει η ταχύτητα του πλοίου. Η μεταβλητή με τη δεύτερη μεγαλύτερη επίδραση είναι το βύθισμα του πλοίου. Μικρότερη αλλά αξιοσημείωτη επίδραση στα αποτελέσματα του υπολογιστικού εργαλείου έχουν κατά σειρά ο συντελεστής επίδρασης της ρύπανσης της γάστρας και ο συντελεστής επίδρασης του καιρού.

Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε μία πλήρης εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου με σκοπό τη λεπτομερή παρουσίαση όλων των αποτελεσμάτων και των αναλύσεων που παρέχει. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν οι αέριες εκπομπές από τη λειτουργία 100 πλοίων που κινήθηκαν από ή/και προς λιμάνια του Ευρωπαϊκού Οικονομικού Χώρου για το έτος 2018. Σύμφωνα με την εν λόγω εφαρμογή, τη μεγαλύτερη ποσότητα συνολικών αερίων εκπομπών αλλά και κάθε τύπου αέριας εκπομπής ξεχωριστά παράγουν τα πλοία τύπου Ro-Ro και ακολουθούν κατά σειρά τα πλοία τύπου Container, τα πλοία τύπου Tanker και τέλος εκείνα τύπου Bulk Carrier. Σε σχετικές έρευνες από τη διεθνή βιβλιογραφία, όμως, διαπιστώνεται πως τα πλοία που επιβαρύνουν περισσότερο το περιβάλλον είναι κατά σειρά εκείνα τύπου Container, Tanker, Bulk Carrier και Ro-Ro. Αυτό όμως συμβαίνει γιατί στις εν λόγω έρευνες λαμβάνεται υπόψη ο αριθμός των πλοίων κάθε τύπου που κυκλοφορεί στην πραγματικότητα, με τα πλοία τύπου Ro-Ro να αποτελούν ένα πολύ μικρό ποσοστό του παγκόσμιου στόλου. Αντιθέτως, στην παρούσα εφαρμογή το δείγμα αποτελείται από ίσο αριθμό πλοίων κάθε τύπου. Από την εφαρμογή λοιπόν φαίνεται να προκύπτει ένα πολύ ενδιαφέρον συμπέρασμα, ότι τα πλοία τύπου Ro-Ro παράγουν μεν τις περισσότερες αέριες εκπομπές όμως η μικρή κυκλοφορία τους σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους πλοίων δεν τα καθιστά ιδιαίτερη απειλή για το περιβάλλον.

Τα πλοία με τις μεγαλύτερες ποσότητες εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) ανά μονάδα μεταφορικής ικανότητας, δηλαδή τα πλοία που χαρακτηρίζονται ως τα λιγότερο ενεργειακά αποδοτικά, είναι εκείνα τύπου Container. Ακολουθούν κατά σειρά τα πλοία τύπου Ro-Ro, Bulk Carrier και Tanker.

Στο σύνολο του δείγματος, αλλά και σε κάθε τύπο πλοίου ξεχωριστά, η συντριπτική πλειονότητα των αερίων εκπομπών αφορά το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Ένα πολύ μικρό ποσοστό αφορά ατμοσφαιρικούς ρύπους, δηλαδή οξειδία του θείου (SO<sub>x</sub>), οξειδία του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και αιωρούμενα σωματίδια (PM). Επιπλέον, όσον αφορά την αναλογία των ατμοσφαιρικών ρύπων στο σύνολο του δείγματος αλλά και σε κάθε τύπο πλοίου ξεχωριστά, το μεγαλύτερο ποσοστό αφορά εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και ακολουθούν οι εκπομπές οξειδίων του θείου (SO<sub>x</sub>) και των αιωρούμενων σωματιδίων (PM).

Τέλος, πραγματοποιήθηκε ακόμα μία εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου με σκοπό αυτή τη φορά την ανάδειξη της δυνατότητάς του να αξιοποιεί στοιχεία από βάσεις δεδομένων, όπως το δορυφορικό σύστημα AIS. Για τον λόγο αυτό όλα τα δεδομένα αντλήθηκαν από την ιστοσελίδα [marinetraffic.com](http://marinetraffic.com), στην οποία παρατίθενται σε πραγματικό χρόνο οι δορυφορικές καταγραφές του AIS. Τα εν λόγω δεδομένα αφορούν την κίνηση ενός πλοίου τύπου Bulk Carrier στη Βαλτική Θάλασσα για 24 ώρες. Τα αποτελέσματα έδειξαν και πάλι πως η συντριπτική πλειονότητα των αερίων εκπομπών αφορούν το CO<sub>2</sub>, ενώ οι ατμοσφαιρικοί ρύποι που παράγονται περισσότερο είναι κατά σειρά τα NO<sub>x</sub>, τα SO<sub>x</sub> και τέλος τα PM.



## 10. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στο σημείο αυτό προτείνονται ορισμένες ιδέες για μελλοντική έρευνα με βάση το υπολογιστικό εργαλείο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία. Αυτές είναι οι ακόλουθες:

- Επέκταση του υπολογιστικού εργαλείου ώστε να εξετάζονται περισσότεροι τύποι πλοίων
- Τροποποίηση του υπολογιστικού εργαλείου ώστε να συνδέεται απευθείας με βάσεις δεδομένων, χωρίς να απαιτείται η δημιουργία αρχείου excel για την εισαγωγή των δεδομένων εισόδου
- Δημιουργία ενός ολοκληρωμένου αξιόπιστου υποστηρικτικού αρχείου από το οποίο θα λαμβάνονται οι τιμές για τα μη διαθέσιμα δεδομένα
- Μελέτη της κατανομής των αερίων εκπομπών στον χώρο και τροποποίηση του υπολογιστικού εργαλείου για την αντίστοιχη γεωγραφική απεικόνιση

## 11. Βιβλιογραφία

Veronika Eyring, Ivar S.A. Isaksen , Terje Berntsen, William J. Collins, James J. Corbett, Oyvind Endresen, Roy G. Grainger, Jana Moldanova, Hans Schlager, David S. Stevenson (2009). Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping

Kevin Cullinane, Rickard Bergqvist (2014). Emission control areas and their impact on maritime transport

Levent Bilgili, Ugur Bugra Celebi (2018). Developing a new green ship approach for flue gas emission estimation of bulk carriers

Apollonia Miola, Biagio Ciuffo (2011). Estimating air emissions from ships: Meta-analysis of modeling approaches and available data resources

James J. Corbett, Paul S. Fischbeck, Spyros N. Pandis (1999). Global nitrogen and sulfur inventories for oceangoing ships

Juan Moreno-Gutierrez, Emilio Pajaro-Velazquez, Yolanda Amado-Sanchez, Ruben Rodriguez-Moreno, Fatima Calderay-Cayetano, Vanesa Duran-Grados (2018). Comparative analysis between different methods for calculating on-board ship's emissions and energy consumption based on operational data

Fatih Alver, Betul Ayhan Sarac, Ulku Alver Sahin (2018). Estimating of shipping emissions in the Samsun Port from 2010 to 2015

A. Maragkogianni, S. Papaefthimiou (2015). Evaluating the social cost of cruise ships air emissions in major ports of Greece

R.A.O. Nunes, M.C.M. Alvim-Ferraz, F.G. Martins, S.I.V. Sousa (2017). The activity-based methodology to assess ship emissions-A review

Carlo Trozzi (2011). Emission estimate methodology for maritime navigation.

J.-P. Jalkanen, A. Brink, J. Kalli, H. Pettersson, J. Kukkonen, T. Stipa (2009). A modelling system for the exhaust emissions of marine traffic and its application in the Baltic Sea area

Tien Anh Tran (2017). A research on the energy efficiency operational indicator EEOI calculation tool on M/V NSU JUSTICE of VINIC transportation company, Vietnam

Stefanos D. Chatzinikolaou, Nikolaos P. Ventikos (2015). Holistic framework for studying ship air emissions in a life cycle perspective

C.A. Kontovas, H.N. Psaraftis (2009). An Online Ship Emissions Calculator as a Decision-Making Aid and Policy Evaluation Tool

Nikolaos P. Ventikos, Eirini-Asimina Stamatopoulou, Konstantinos Louzis, Panagiotis Sotiralis, Giannis Kalogeropoulos, Theano Zagliveri (2019). Developing an Open-Access Tool for Calculating Ship Air Emissions

Haakon Lindstad, Gunnar S. Eskeland, Harilaos Psaraftis, Inge Sandaas, Anders H. Stromman (2015). Maritime shipping and emissions: A three-layered, damage-based approach

Harilaos N. Psaraftis, Christos A. Kontovas (2009). CO2 Emission Statistics for the World Commercial Fleet

Carlo Trozzi (2010). Emission estimate methodology for maritime navigation

Levent Bilgili, Ugur Burga Celebi, Tolga Mert (2015). Estimation of Ship Exhaust Gas Emissions

European Environment Agency (2013). The impact of international shipping on European air quality and climate forcing

European Commission (2020). 2019 Annual Report on CO2 Emissions from Maritime Transport

IMO (2014). Third IMO Greenhouse Gas Study 2014. Executive Summary and Final Report

IMO (2009). Second IMO GHG Study 2009

IMO (2009). Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency operational indicator (EEOI). MEPC.1/Circ.684

IMO (2009). Interim guidelines on the method of calculation of the energy efficiency design index for new ships. MEPC.1/Circ.681

ICCT (2017). Greenhouse gas emissions from global shipping,2013-2015. Detailed methodology

Lighthouse (2018). Transport work and emissions in MRV; methods and potential use of data

Κ. Σπύρου (2017). Μελέτη και εξοπλισμός πλοίου ΙΙ. Σημειώσεις διδάσκοντος και πρόσθετο βοηθητικό υλικό, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Γ.Κ. Πολίτης (2011). Σημειώσεις μαθήματος: «Αντίστασης και Πρόωσης Πλοίου», Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Γ.Α. Αθανασούλης, Κ.Α. Μπελιμπασάκης (2012). Δυναμική Πλοίου, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ν.Π. Κυρτάτος (2017). Εγκαταστάσεις Πρόωσης. Σημειώσεις Διδάσκοντος, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Δρ. Μ. Ώξενκιουν-Πετροπούλου (2010). Περιβάλλον - Ατμοσφαιρική Ρύπανση, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

A. Bourazanis (2015). Probabilistic Analysis/Estimation on Fuel Consumption and Ship Emissions. Diploma Thesis, School of Naval Architecture and Marine Engineering, National Technical University of Athens

Ι. Δασκαλάκης (2015). Λειτουργικός υπολογισμός αερίων εκπομπών στον κύκλο ζωής πλοίων: Ανάπτυξη υπολογιστικού προγράμματος. Διπλωματική εργασία, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Χ. Δασκαλάκης (2018). Συγκριτική μελέτη της λειτουργίας στόλου με τη χρήση κριτηρίων βιωσιμότητας: Ανάπτυξη υπολογιστικού εργαλείου. Διπλωματική εργασία, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Η. Ραμαντάνης (2009). Στοιχεία για την Αλληλεπίδραση Ναυτιλίας και Κλιματικών Αλλαγών. Διπλωματική εργασία, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σ. Έξαρχος (2013). Ατμοσφαιρική Ρύπανση από Πλοία. Διεθνείς και Ευρωπαϊκές Εξελίξεις. Διπλωματική εργασία, Τμήμα Ναυτιλιακών Σπουδών, Πανεπιστήμιο Πειραιά

[www.worldshipping.org](http://www.worldshipping.org)

[www.transportenvironment.org](http://www.transportenvironment.org)

[www.gpca.org.ae](http://www.gpca.org.ae)

[wiki.analytica.com](http://wiki.analytica.com)

[www.imo.org](http://www.imo.org)

[www.marinetraffic.com](http://www.marinetraffic.com)

[mrv.emsa.europa.eu](http://mrv.emsa.europa.eu)