

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ



**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ
ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΠΟ ΤΙΣ ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ**

ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΛΙΜΕΝΑ ΠΕΙΡΑΙΑ

Διπλωματική Εργασία

Θεανώ Ζαγκλιβέρη

Επιβλέπων

Νικόλαος Π. Βεντικός

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2022

~ Αυτή η σελίδα έμεινε σκόπιμα λευκή ~

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All right reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση, ή διανομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας (ή τμήματος αυτής) για εμπορικούς σκοπούς. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπούς μη κερδοσκοπικούς, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση της αναφοράς της πηγής προέλευσης και της διατήρησης του παρόντος μηνύματος. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς την συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη διπλωματική εργασία, εκφράζουν αποκλειστικά την συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του κ. Νικόλαου Π Βεντίκου, Αναπληρωτή Καθηγητή της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, και της υποψήφιας διδάκτορα της σχολής κ. Ειρήνης Α. Σταματοπούλου, και αποτελεί το επισφράγισμα του προπτυχιακού κύκλου σπουδών μου στη σχολή. Με την ολοκλήρωση της θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή και τους υποψήφιους διδάκτορες του για την πολύτιμη καθοδήγηση και τις συμβουλές τους.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους, και συμφοιτητές μου που με στήριξαν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών, αλλά κυρίως για την συνεχή ενθάρρυνση και παρότρυνση τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

~ Αυτή η σελίδα έμεινε σκόπιμα λευκή ~

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια η ανάγκη για μείωση των εκπομπών έχει γίνει επιτακτική ανάγκη, όχι μόνο για τη ναυτιλία, αλλά και γενικότερα. Για τη ναυτιλία έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες τόσο για τον υπολογισμό των εκπομπών αλλά και για την εύρεση μεθόδων μείωσης τους, ενώ παράλληλα έχουν ληφθεί και αντίστοιχα μέτρα για την μείωση τους. Οι εκπομπές από τα πλοία εντός των λιμένων μπορεί να αποτελούν σημαντικά μικρότερο ποσοστό σε σχέση με το σύνολο της ναυτιλίας αλλά είναι πηγές συγκεντρωμένων εκπομπών καυσαερίων που προκαλούν επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα, έχοντας άμεσο ή έμμεσο αποτέλεσμα τόσο στην υγεία των κατοίκων της περιοχής, όσο και στην επιβάρυνση του περιβάλλοντος.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η ανάπτυξη ενός υπολογιστικού εργαλείου, για τον αναλυτικό υπολογισμό των εκπομπών καυσαερίων, λόγω της λειτουργίας των πλοίων στα όρια του λιμένα. Συγκεκριμένα, έχοντας συγκεντρώσει και αναλύσει μελέτες και μεθοδολογίες για τον υπολογισμό των εκπομπών, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η μεθοδολογία που αναπτύσσεται στην 4^η Έκθεση του IMO, που βασίζεται σε δεδομένα δραστηριότητας των πλοίων.

Στα πρώτα τέσσερα κεφάλαια της διπλωματικής εργασίας, παρουσιάζονται, 1) το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από την ναυτιλία, 2) οι εκπομπές που παρατηρούνται εντός των ορίων του λιμένα, 3) οι τρόποι λειτουργίας και η οργάνωση των λιμένων, που ουσιαστικά επηρεάζει τα μέτρα που λαμβάνονται για την μείωση των εκπομπών, και 4) οι νομοθετικές ρυθμίσεις και κανόνες που διέπουν τη λειτουργία των θαλάσσιων μεταφορών ως προς το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα.

Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε, η περιγραφή του υπολογιστικού εργαλείου, το οποίο αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Python. Η εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου γίνεται για το λιμάνι του Πειραιά, για επιβατηγά – οχηματαγωγά πλοία και κρουαζιερόπλοια. Τα απαραίτητα τεχνικά χαρακτηριστικά των πλοίων εξήχθησαν από βάσεις δεδομένων, ενώ οι κινήσεις των πλοίων από το αυτόματο σύστημα αναγνώρισης θέσης (AIS) των πλοίων.

Η μελέτη έγινε για πλοία ολικής χωρητικότητας άνω των 5000 τόνων, για μία εβδομάδα κάθε μήνα, με ημερομηνίες από 22 έως 28 του μήνα, για τους μήνες Νοέμβριο 2020 έως Οκτώβριο 2021. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής παρουσιάζονται αναλυτικά, και μπορούν να εξαχθούν από αυτά χρήσιμα συμπεράσματα για την ατμοσφαιρική ρύπανση στην περιοχή της πόλης του Πειραιά, και ευρύτερης της Αττικής, καθώς επίσης να συμβάλλουν στη διαμόρφωση πολιτικών και μέτρων περιορισμού των εκπομπών, με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα.

Λέξεις κλειδιά:

ατμοσφαιρική ρύπανση, λιμάνι Πειραιά,
εκπομπές πλοίων, υπολογισμός αέριων ρύπων,
Python, AIS, υπολογιστικό εργαλείο

Abstract

In recent years, the need to reduce emissions has preoccupied the scientific community on a worldwide level, not only for the shipping sector but for total emissions. For the shipping sector, several studies have been conducted, either to calculate emissions or to find methods and tools to reduce them. At the same time, measures to reduce the emissions have been taken. Even though in-port emissions are merely a small percentage of the total shipping emissions, ports constitute important sources of concentrated ship exhaust emissions, that affect air quality, causing a direct or indirect effect on the health of the local population, and burden on the environment.

The aim of this dissertation is the development of a computational tool for the detailed calculation of exhaust emissions by ships' emissions in ports. In detail, having gathered and analyzed several methodologies and studies for the calculation of emissions, the methodology followed in the 4th IMO GHG Study was chosen, which is based on data relevant to ships' activity.

The first four chapters present: 1) the problem of air pollution from the shipping sector, 2) main emissions/pollutants within ports, 3) modes of operation and organization of ports, which affects the measures taken to reduce emissions, and 4) the environmental legislation and policies regulating the operation of maritime transport in terms of their environmental footprint.

In the next chapters, the selected methodology is presented, as well as the detailed description of the computational tool, which was developed in the Python, programming language. The computational tool was utilized to calculate emissions produced by Ro-Pax ferries and cruise ships in the port of Piraeus. Data regarding ships' technical characteristics have been extracted from databases and the data regarding ships' movement from the Automatic Identification System (AIS).

The case study has been conducted for ships with a gross tonnage of over 5000 tons, for one week each month, within the dates from 22 to 28, for the period of November 2020 to October 2021. The results of the case study are presented in detail, and useful conclusions can be provided for the air pollution in the city of Piraeus, and the wider Attica region. They can, also, contribute to the design of policies and measures to reduce emissions, aiming for the improvement of air quality.

Keywords:

air pollution, port of Piraeus,

ship emissions, calculation of gaseous pollutants,

Python, AIS, computational tool

~ Αυτή η σελίδα έμεινε σκόπιμα λευκή ~

Περιεχόμενα

Λίστα Πινάκων	1
Λίστα Γραφημάτων.....	2
Λίστα Εικόνων	3
Κατάλογος Συντομογραφιών (Αγγλικά).....	4
Κατάλογος Συντομογραφιών (Ελληνικά)	6
Κατάλογος Μονάδων Μέτρησης	6
1. Εισαγωγή	7
1.1. Σκοπός και μεθοδολογία	7
1.2. Προσδοκώμενα αποτελέσματα	7
1.3. Δομή της Διπλωματικής Εργασίας.....	7
2. Κλιματική Αλλαγή & Ατμοσφαιρική Ρύπανση	9
2.1. Εισαγωγή.....	9
2.2. Κλιματική Αλλαγή	9
2.3. Πηγές Εκπομπών Αερίων Ρύπων στους Λιμένες.....	10
2.4. Εκπομπές στους Λιμένες.....	11
3. Οργάνωση και Λειτουργία Λιμένων	15
3.1. Εισαγωγή.....	15
3.2. Ορισμός και Χαρακτηριστικά των Λιμένων	15
3.3. Οργάνωση των Λιμένων	15
3.3.1. Δημόσια Λιμάνια	16
3.3.2. Ιδιωτικά Λιμάνια.....	17
3.3.3. Τερματικά Λιμένων.....	17
4. Νομοθεσία και Κανονισμοί	19
4.1. Εισαγωγή.....	19
4.2. Διεθνής Νομοθεσία	19
4.2.1. Διεθνής Σύμβαση MARPOL 73/78	19
4.2.2. Ευρωπαϊκή Νομοθεσία.....	20
4.3. Ελληνική Νομοθεσία.....	20
4.4. Ισχύοντα Μέτρα για τις Εκπομπές από την Ναυτιλία	21
4.4.1. Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (EEDI)	24
4.4.2. Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Αποδοτικότητας Πλοίου (SEEMP)	24
4.4.3. Δείκτης Λειτουργικής Ενεργειακής Αποδοτικότητας (EEOI).....	25
4.4.4. Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης Υπάρχοντος Πλοίου(EEXI)	25
4.4.5. Ετήσιος Δείκτης Έντασης Λειτουργικού Άνθρακα (Annual Operational CII)	26
4.5. Παρακολούθηση Αερίων Εκπομπών	26

4.5.1.	EU MRV	26
4.5.2.	IMO DCS	27
5.	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Έρευνών Υπολογισμού Αερίων Εκπομπών	28
5.1.	Εισαγωγή.....	28
5.2.	Μέθοδοι Υπολογισμού Αερίων Εκπομπών.....	28
5.2.1.	Μέθοδος «μικροκλίμακας» - Προσέγγιση “Bottom-up”	28
5.2.2.	Μέθοδος «μακροκλίμακας» - Προσέγγιση “Top-down”	28
5.3.	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	29
5.3.1.	Έρευνες Μεγάλης Κλίμακας	29
5.3.2.	Έρευνες σε Επίπεδο Λιμένων.....	30
6.	Αναλυτικές Μεθοδολογίες Υπολογισμού Αερίων Εκπομπών	32
6.1.	Εισαγωγή.....	32
6.2.	Εγχειρίδιο EMEP/EEA 2019.....	32
6.3.	4 ^η Έκθεση GHG IMO.....	36
7.	Περιγραφή Υπολογιστικού Εργαλείου Εκτίμησης Ρύπων.....	44
7.1.	Εισαγωγή.....	44
7.2.	Περιγραφή Υπολογιστικού Εργαλείου.....	44
7.3.	Γλώσσα Προγραμματισμού Python.....	48
7.4.	Αυτόματο Σύστημα Αναγνώρισης Πλοίων (AIS)	49
7.5.	Βάση Δεδομένων	51
7.6.	Δεδομένα Εξόδου	52
8.	Αποτελέσματα Υπολογιστικού Εργαλείου Εκτίμησης Ρύπων	53
8.1.	Εισαγωγή.....	53
8.2.	Ανάλυση Αποτελεσμάτων.....	53
8.2.1.	Συνολικά Αποτελέσματα Αερίων Εκπομπών	53
8.2.2.	Σύγκριση Αποτελεσμάτων ανά Τύπο Μηχανής.....	54
8.2.3.	Σύγκριση Αποτελεσμάτων ανά Τύπο Πλοίου	55
8.2.4.	Σύγκριση Αποτελεσμάτων ανά Μήνα.....	58
8.2.5.	Σύγκριση Αποτελεσμάτων ανά Φάση Λειτουργίας	59
8.2.6.	Μελέτη Περίπτωσης σχετικά με τις Πλυντρίδες (Scrubbers)	61
8.2.7.	Γεωγραφική Απεικόνιση των Ατμοσφαιρικών Ρύπων.....	63
8.2.8.	Δευτερογενής Επεξεργασία Αποτελεσμάτων – Επέκταση	64
9.	Επισκόπηση – Συμπεράσματα – Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα	68
	Βιβλιογραφία	70
	Παράρτημα	73
	Ενδεικτική Παρουσίαση του Κώδικα.....	73

Εισαγωγή Βιβλιοθηκών.....	73
Συντελεστής Εκπομπής NOx	73
Αρχικοποίηση Ισχύος Βοηθητικών Μηχανών.....	74
Κατασκευή Χάρτη «Γεωγραφικής Απεικόνισης».....	74
Κατασκευή Διαγραμμάτων «Σύγκριση Εκπομπών ανά Τύπο Μηχανής».....	75

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1 SWOT ανάλυση λιμένα ιδιοκτήτη.....	16
Πίνακας 2 SWOT ανάλυση λειτουργικού λιμένα.....	17
Πίνακας 3 SWOT ανάλυση ιδιωτικού λιμένα	17
Πίνακας 4 Όρια στις εκπομπές NO _x	22
Πίνακας 5 Εγκατεστημένη ισχύς ως συνάρτηση της χωρητικότητας GT	35
Πίνακας 6 Μέση εκτιμώμενη αναλογία μεταξύ κύριων και βοηθητικών μηχανών	35
Πίνακας 7 Φορτίο μηχανών ως ποσοστό της μέγιστης συνεχούς ισχύος.....	35
Πίνακας 8 Διάκριση φάσεων λειτουργίας σύμφωνα με την 3η Έκθεση του IMO	38
Πίνακας 9 Διάκριση φάσεων λειτουργίας σύμφωνα με την 4η Έκθεση του IMO	38
Πίνακας 10 Τιμές της βασικής ειδικής κατανάλωσης καυσίμου σε g / kWh	39
Πίνακας 11 Συντελεστές χαμηλού φορτίου.....	40
Πίνακας 12 Τιμές του συντελεστή εκπομπής CO ₂	41
Πίνακας 13 Παγκόσμια μέση περιεκτικότητα σε θείο ανά τύπο καυσίμου ανά έτος	42
Πίνακας 14 Τιμές του συντελεστή εκπομπής NO _x	42
Πίνακας 15 Συντελεστής εκπομπής CO ανά τύπου κινητήρα και καύσιμο.....	43
Πίνακας 16 Δεδομένα εισαγωγής στοιχείων πλοίων	45
Πίνακας 17 Δεδομένα εισαγωγής δραστηριότητας πλοίων.....	45
Πίνακας 18 Τιμές συντελεστών επίδρασης καιρού και ρυπασμένης γάστρας.....	45
Πίνακας 19 Μέσος λόγος βυθίσματος ανά έτος	46
Πίνακας 20 Τιμές Περιεκτικότητας θείου στα καύσιμα	46
Πίνακας 21 Συντελεστές μετατροπής για ισοδύναμο CO ₂	47
Πίνακας 22 Συντελεστές εκπομπής CO _{2e} ανάλογα με τον τύπο καυσίμου	47
Πίνακας 23 Ισχύς βοηθητικών μηχανών και λεβήτων.....	47
Πίνακας 24 Υπολογιζόμενες αέριες εκπομπές	54
Πίνακας 25 Διαστάσεις υπό μελέτη πλοίων.....	62
Πίνακας 26 Συνολικές αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια του έτους	65
Πίνακας 27 Συνολικές αέριες εκπομπές (1.10.2017 - 30.9.2018)	65

Λίστα Γραφημάτων

Γράφημα 1 Μηνιαίος μέσος όρος συγκέντρωσης CO ₂	12
Γράφημα 2 Κατανομή εκπομπών στο Λιμάνι του Los Angeles.....	14
Γράφημα 3 Όρια περιεκτικότητας σε θείο	21
Γράφημα 4 Όριο εκπομπών οξειδίων αζώτου.....	23
Γράφημα 5 Αφίξεις στον λιμένα του Πειραιά	51
Γράφημα 6 Αναχωρήσεις από τον λιμένα του Πειραιά	51
Γράφημα 7 Συνολικές αέριες εκπομπές	53
Γράφημα 8 Σύγκριση εκπομπών ανά τύπο μηχανής.....	54
Γράφημα 9 Σύγκριση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ανά τύπο μηχανής.....	55
Γράφημα 10 Σύγκριση συνολικών εκπομπών ανά τύπο πλοίου	56
Γράφημα 11 Σύγκριση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ανά τύπο πλοίου	56
Γράφημα 12 Σύγκριση συνολικών εκπομπών ανά αριθμό αφίξεων ανά τύπο πλοίου	57
Γράφημα 13 Σύγκριση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ανά αριθμό αφίξεων ανά τύπο πλοίου.....	57
Γράφημα 14 Κατανομή εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO _x) κατά τη διάρκεια ενός έτους.....	58
Γράφημα 15 Κατανομή εκπομπών οξειδίων του θείου (SO _x) κατά τη διάρκεια ενός έτους.....	58
Γράφημα 16 Κατανομή εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων (PM) κατά τη διάρκεια ενός έτους... ..	59
Γράφημα 17 Κατανομή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (CO ₂ e) κατά τη διάρκεια ενός έτους... ..	59
Γράφημα 18 Σύγκριση συνολικών εκπομπών ανά φάση λειτουργίας.....	60
Γράφημα 19 Σύγκριση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ανά φάση λειτουργίας	60
Γράφημα 20 Συνολική διάρκεια ανά φάση λειτουργίας.....	61
Γράφημα 21 Συνολικές αέριες εκπομπές	62
Γράφημα 22 Εκπομπές CO ₂ e.....	63
Γράφημα 23 Συνολικές αέριες εκπομπές ανά μήνα.....	66
Γράφημα 24 Συνολικές εκπομπές CO ₂ e ανά μήνα	66
Γράφημα 25 Αναλογία συνολικών αερίων εκπομπών	67
Γράφημα 26 Αναλογία κάθε ατμοσφαιρικού ρύπου	67

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1 Πηγές εκπομπών ρύπων σε λιμένες	11
Εικόνα 2 Σχηματικό διάγραμμα των επιπτώσεων των εκπομπών αέριων ρύπων από την ναυτιλία..	13
Εικόνα 3 Τοπικά και παγκόσμια όρια θείου	22
Εικόνα 4 Πλαίσιο του σχεδίου διαχείρισης ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίου (SEEMP)	25
Εικόνα 5 Χάρτης υπό μελέτη περιοχής.....	44
Εικόνα 6 Απεικόνιση πλοίων μέσω AIS.....	50
Εικόνα 7 Εκπομπές ανάλογα με τη θέση του πλοίου	64
Εικόνα 8 Γραφική απεικόνιση του λιμανιού - Πύλες λιμανιού	64
Εικόνα 9 Εισαγωγή βιβλιοθηκών.....	73
Εικόνα 10 Συντελεστής εκπομπής NOx	73
Εικόνα 11 Ισχύς βοηθητικών μηχανών	74
Εικόνα 12 Κατασκευή χάρτη γεωγραφικής απεικόνισης	74
Εικόνα 13 Κατασκευή διαγραμμάτων "Σύγκριση εκπομπών ανά τύπο μηχανής"	75

Κατάλογος Συντομογραφιών (Αγγλικά)

AIS	Automatic Identification System Σύστημα Αυτόματης Αναγνώρισης Θέσης πλοίου
API	Application Programming Interface Διεπαφή Προγράμματος Εφαρμογής
BC	Black Carbon Αιθάλη
BFO	Bunker Fuel Oil Ναυτιλιακό Καύσιμο
CCS	China Classification Society Κινέζικος Νηογνώμονας
CH ₄	Methane Μεθάνιο
CII	Carbon Intensity Indicator Δείκτης Έντασης Άνθρακα
CO	Carbon Monoxide Μονοξείδιο του Άνθρακα
CO ₂	Carbon Dioxide Διοξείδιο του Άνθρακα
CO _{2e}	Carbon Dioxide equivalent Ισοδύναμο Διοξειδίου του Άνθρακα
DCS	Data Collection System Σύστημα Συλλογής Δεδομένων
DPM	Diesel Particulate Matter Σωματίδια εκπομπών καύσης καυσίμου Diesel
ECA	Emission Control Area Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών καυσαερίων των πλοίων
EEA	European Environment Agency Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος
EEDI	Energy Efficiency Design Index Δείκτης Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης
EEOI	Energy Efficiency Operational Indicator Δείκτης Λειτουργικής ενεργειακής Απόδοσης
EEXI	Energy Efficiency Existing Ship Index Υφιστάμενος Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης
EF	Emission Factor Συντελεστής Εκπομπών ρύπων
EGR	Exhaust Gas Recirculation Ανακυκλοφορία Καυσαερίων
EMSA	European Maritime Safety Agency Ευρωπαϊκός Οργανισμός για την Ασφάλεια στην Θάλασσα
FC	Fuel Consumption Κατανάλωση Καυσίμου
GHG	Greenhouse Gas Αέρια του Θερμοκηπίου
HC	Hydrocarbons Υδρογονάνθρακες
HFO	Heavy Fuel Oil

	Ναυτιλιακό Καύσιμο
HSD	High Speed Diesel
IAPH	International Association of Ports and Harbors Διεθνής Ένωση Λιμένων
IEEC	International Energy Efficiency Certificate Διεθνές Πιστοποιητικό Ενεργειακής Αποδοτικότητας
IMO	International Maritime Organization Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός
IPCC	International Panel on Climate Change Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος
LLF	Low Load Factor Συντελεστής Χαμηλού Φορτίου
LNG	Liquefied Natural Gas Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο
LSHFO	Low Sulphur Heavy Fuel Oil Ναυτιλιακό Καύσιμο με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο
MARPOL	International Convention for the Prevention of Marine Pollution from Ships Διεθνής Σύμβαση για την Πρόληψη της Ρύπανσης από τα Πλοία
MCR	Maximum Continuous Rating Μέγιστη Συνεχής Ισχύς
MDO	Marine Diesel Oil Ναυτιλιακό Καύσιμο Diesel
MEPC	Marine Environment Protection Committee Επιτροπή Προστασίας Θαλασσίου Περιβάλλοντος
MGO	Marine Gas Oil Ναυτιλιακό Καύσιμο Diesel
MMSI	Maritime Mobile Service Identity Διακριτικό Σταθμού Πλοίου
MRV	Monitoring, Reporting and Verification of CO ₂ emissions from maritime Καταγραφή, Αναφορά και Πιστοποίηση εκπομπών Διοξειδίου του άνθρακα από τη ναυτιλία
MSD	Medium Speed Diesel
N ₂ O	Nitrous Oxide Υποξείδιο του Αζώτου
NECA	Nitrogen Emission Control Area Περιοχή Ελέγχου Εκπομπών οξειδίων του Αζώτου
NM VOC	Non-Methane Volatile Organic Compound Πτητική Οργανική Ένωση εκτός Μεθανίου
NO _x	Nitrogen Oxides Οξείδια του Αζώτου
PM	Particulate Matter Αιρούμενα Σωματίδια
RO	Residual Oil Υπολειμματικό Έλαιο, μετά την διύλιση
RSZ	Reduced Speed Zones Περιοχές Μειωμένης Ταχύτητας
SCR	Selective Catalytic Reduction Επιλεκτική Καταλυτική Αναγωγή
SECA	Sulphur Emission Control Area Περιοχή Ελέγχου Εκπομπών οξειδίων του Θείου

SEEMP	Ship Energy Efficiency Management Plan Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Αποδοτικότητας Πλοίου
SFC ή SFOC	Specific Fuel Consumption ή Specific Fuel Oil Consumption Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου
SIN	Shipping Intelligence Network
SO _x	Sulphur Oxides Οξειδία του Θείου
SSD	Slow Speed Diesel
STEAM	Ship Traffic Emission Assessment Model
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change Σύμβαση – Πλαίσιο των Η.Ε. για την Κλιματική Αλλαγή
USEPA	United States Environment Protection Agency Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ
UV	Ultraviolet Υπεριώδης Ακτινοβολία
VHF	Very High Frequency Υπερβραχέα Κύματα
VOC	Volatile Organic Compound Πτητική Οργανική Ένωση
VTS	Vessel Traffic Services Υπηρεσίες Κυκλοφορίας Πλοίων

Κατάλογος Συντομογραφιών (Ελληνικά)

ΔΘΠ	Δυναμικό Θέρμανσης του Πλανήτη
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΕΚ	Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο
ΕΛΛΑΚ	Ελεύθερο Λογισμικό / Λογισμικό Ανοιχτού Κώδικα
ΦΕΚ	Φύλλο Εφημερίδας της Κυβερνήσεως

Κατάλογος Μονάδων Μέτρησης

DWT	Deadweight Tonnage
g	gram
GT	Gross Tonnage
kn	knot
kW	kilowatt
kwh	kilowatt hour
m	meter
nm	nautical mile
ppm	parts-per-million
RPM	Revolutions per Minute
t	tonne

1. Εισαγωγή

1.1. Σκοπός και μεθοδολογία

Τα πλοία εδώ και πολλούς αιώνες αποτελούν το κύριο μέσο μεταφοράς αγαθών παγκοσμίως, και ο ρόλος της ναυτιλίας εξακολουθεί, στο πέρασμα των χρόνων, να παραμένει αναλλοίωτος για την παγκόσμια οικονομία. Τα λιμάνια αποτελούν κόμβους διασύνδεσης της ναυτιλίας με άλλα μέσα μεταφοράς αγαθών, αλλά και κόμβους μετακίνησης επιβατών. Η ποιότητα του αέρα στις αστικές περιοχές είναι ένας σημαντικός δείκτης για την ποιότητα της ζωής των πολιτών. Βιομηχανικές περιοχές ή λιμένες σε εγγύτητα με αστικά συγκροτήματα, παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για μελέτη, καθώς υπάρχουν πηγές εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν και να θέσουν σε κίνδυνο, βραχυπρόθεσμα ή μακροπρόθεσμα, την υγεία και την ευημερία των πολιτών. Στην παρούσα εργασία, αναπτύσσεται ένα υπολογιστικό εργαλείο για την εκτίμηση των ρύπων στην περιοχή των λιμένων, με χρήση του συστήματος AIS.

1.2. Προσδοκώμενα αποτελέσματα

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί να προσεγγίσει το ζήτημα των αέριων εκπομπών και ρύπων από επιβατηγά πλοία εντός του λιμένα Πειραιά, μέσω ποσοτικής εκτίμησης των αέριων εκπομπών των πλοίων, βασισμένη στην δραστηριότητα τους. Αυτή η ποσοτικοποίηση των εκπομπών και η ανάπτυξη κατάλληλου υπολογιστικού εργαλείου, μπορεί να βοηθήσει στην παρακολούθηση και αποτίμηση των συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή του λιμένα Πειραιά, καθώς και στην χάραξη κατάλληλων πολιτικών, για τη μείωση των αέριων εκπομπών. Αυτή η διπλωματική εργασία αποτελεί ουσιαστικά συμπλήρωμα στη διπλωματική εργασία «Κατασκευή Υπολογιστικού Εργαλείου για τον Αναλυτικό Υπολογισμό των Αέριων Εκπομπών από τη Λειτουργία των Πλοίων», στην οποία γίνεται υπολογισμός των αέριων εκπομπών κατά τη διάρκεια του ταξιδιού των πλοίων [1].

1.3. Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Για τον σκοπό αυτό, η εργασία διαρθρώνεται ως εξής, αρχικά στο Κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στην κλιματική αλλαγή και στην ατμοσφαιρική ρύπανση, δίνοντας έμφαση στις συνήθεις αέριες εκπομπές από λιμενικές δραστηριότητες και πλωτά μέσα. Έπειτα, στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι τρόποι οργάνωσης και λειτουργίας των λιμένων, αφού αυτοί επηρεάζουν τους εκπεμπόμενους ρύπους του λιμένα και τις λύσεις για την μείωση τους. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται η Διεθνής και η εγχώρια νομοθεσία σχετικά με τους εκπεμπόμενους ρύπους, και οι ισχύοντες κανονισμοί. Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται βιβλιογραφική αναφορά σε παρεμφερείς εργασίες, όπου παρουσιάζονται είτε μελέτες μεγάλης κλίμακας, είτε μελέτες σε επίπεδο λιμένα. Στο Κεφάλαιο 6, μελετώνται εκτενώς οι δύο κύριες μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί για τον υπολογισμό των εκπομπών από τα πλοία, το εγχειρίδιο EMEP/EEA 2019, και η 4^η Έκθεση του IMO. Στο κεφάλαιο 7 περιγράφεται το υπολογιστικό εργαλείο λεπτομερώς, καθώς και τα εργαλεία και οι βάσεις δεδομένων που

χρησιμοποιήθηκαν. Τέλος, στο Κεφάλαιο 8 αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τη χρήση του υπολογιστικού εργαλείου.

2. Κλιματική Αλλαγή & Ατμοσφαιρική Ρύπανση

2.1. Εισαγωγή

Ως περιβάλλον ορίζεται το σύνολο των φυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων που βρίσκονται σε αλληλεπίδραση και επηρεάζουν την οικολογική ισορροπία, την ποιότητα ζωής, την υγεία των κατοίκων, την ιστορική και πολιτιστική παράδοση και τις αισθητικές αξίες μιας περιοχής¹. Η ποιότητα της ανθρώπινης ζωής εξαρτάται από το περιβάλλον, στοιχεία του οποίου είναι το νερό, το έδαφος, το κλίμα και η ατμόσφαιρα. Η ατμόσφαιρα της Γης αποτελεί ένα από τα πιο πολύτιμα φυσικά αγαθά, με γνωστή τη σημασία της για τη ζωή στον πλανήτη, αλλά η υποβάθμιση της είναι συνεχής.

Η ατμοσφαιρική ρύπανση συγκαταλέγεται μαζί με την θαλάσσια, την πετρελαϊκή και την ακουστική ρύπανση, στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ναυτιλίας. Τα πλοία εκπέμπουν στην ατμόσφαιρα καυσαέρια συμβάλλοντας σημαντικά στην αύξηση των ανθρωπογενών εκπομπών.

Οι θαλάσσιες μεταφορές αποτελούν τον βασικό κορμό του διεθνούς εμπορίου και της εφοδιαστικής αλυσίδας, καθώς ποσοστό μεγαλύτερο από το 80 τοις εκατό του παγκόσμιου εμπορίου μεταφέρεται δια θαλάσσης. Το 2019 καταγράφηκαν 51684 πλοία με συνολική χωρητικότητα άνω των 1000 GT παγκοσμίως [2]. Η ποντοπόρος ναυτιλία είναι υπεύθυνη για το 2.89% των παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών [3]. Επειδή τα πλοία μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες φορτίου, η χρήση καυσίμου ανά τόνο φορτίου είναι μικρότερη σε σύγκριση με άλλες μεταφορικές μεθόδους, όπως αεροπορικές και οδικές μεταφορές.

2.2. Κλιματική Αλλαγή

Με τον όρο κλιματική αλλαγή ορίζεται η μεταβολή του παγκόσμιου κλίματος και ειδικότερα οι μεταβολές των μετεωρολογικών συνθηκών που εκτείνονται σε μεγάλη χρονική κλίμακα. Τέτοιου τύπου μεταβολές περιλαμβάνουν στατιστικά σημαντικές διακυμάνσεις ως προς τη μέση κατάσταση του κλίματος ή τη μεταβλητότητα του, που εκτείνονται σε βάθος χρόνου δεκαετιών ή περισσότερων ετών. Οι κλιματικές αλλαγές οφείλονται σε φυσικές διαδικασίες, καθώς και σε ανθρωπίνες δραστηριότητες με επιπτώσεις στο κλίμα, όπως η τροποποίηση της σύνθεσης της ατμόσφαιρας [4].

Συγκεκριμένα, κλίμα ονομάζεται η μέση καιρική κατάσταση ή ο μέσος καιρός μιας περιοχής, που προκύπτει από τις μακροχρόνιες παρατηρήσεις των διάφορων μετεωρολογικών στοιχείων (θερμοκρασία, άνεμος, πίεση, υγρασία) [5]. Οι αιτίες της κλιματικής αλλαγής οφείλονται σε φυσικές εσωτερικές διαδικασίες, όπως δυναμικές και θερμοδυναμικές αλληλοεπιδράσεις μεταξύ ατμόσφαιρας και ωκεανών, σε ηφαιστειογενείς εκρήξεις, αλλαγές στην ηλιακή ακτινοβολία, καθώς και σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες που επιφέρουν αλλαγές στη δομή και σύσταση της ατμόσφαιρας ή αλλαγές στη χρήση της γης. Με τη «βιομηχανική επανάσταση», οι παραγωγικές δραστηριότητες του ανθρώπου έχουν αυξηθεί σημαντικά, μεταβάλλοντας δραστικά τη σύσταση της ατμόσφαιρας. Διαθέσιμα δεδομένα παρατηρήσεων δείχνουν αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), καθώς και άλλων αερίων, λόγω ανθρωπογενών αιτιών [6]. Χαρακτηριστικό αποτέλεσμα των

¹ ΝΟΜΟΣ υπ' αριθ. 1650/1986, άρθρο 2

παραπάνω παρατηρήσεων στη μεταβολή της σύστασης της ατμόσφαιρας είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Επομένως, τα εκπεμπόμενα στην ατμόσφαιρα αέρια καθώς και οι ρύποι, επιδρούν στη σύσταση της ατμόσφαιρας και στην κλιματική αλλαγή. Παρακάτω, αναλύονται τα βασικότερα αέρια και οι ρύποι που συναντώνται σε περιοχές λιμένων, καθώς και οι πηγές από τις οποίες αυτά προέρχονται, σύμφωνα με το έγγραφο της Διεθνούς Ένωσης Λιμένων – International Association of Ports and Harbors (IAPH) με τίτλο “Port Emissions Toolkit, Guide No.1, Assessment of port emissions”.

2.3. Πηγές Εκπομπών Αερίων Ρύπων στους Λιμένες

Τα πλοία αποτελούν έναν βασικό παράγοντα των εκπομπών σε ένα λιμάνι, αλλά υπάρχουν διάφορες ακόμα πηγές εκπομπών. Σε αυτές μπορεί να συγκαταλέγονται οι κτιριακές υποδομές, χώροι γραφείων και χώροι αποθήκευσης, μέσα διακίνησης φορτίου, οχήματα, γερανοί, λιμενικά σκάφη, ρυμουλκά σκάφη και άλλες πηγές. Τα παραπάνω μέσα, που ευθύνονται για τα καυσαέρια στο λιμάνι, όμως υπάρχει περίπτωση κάποια από αυτά να λειτουργούν με ηλεκτρισμό. Σε αυτήν την περίπτωση, οι εκπομπές λαμβάνουν χώρα στην πηγή όπου παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια. Παρακάτω, γίνεται κατηγοριοποίηση των εκπομπών, σύμφωνα με την Διεθνή Ένωση Λιμένων [7].

1^ο Πεδίο (Scope 1) – Άμεσες Πηγές

Αυτές οι εκπομπές προέρχονται από δραστηριότητες που λειτουργούν και ελέγχονται από τον διαχειριστικό φορέα του λιμένα. Περιλαμβάνονται εκπομπές από οχήματα του διαχειριστικού φορέα του λιμένα, κτιριακές υποδομές, από εξοπλισμό διακίνησης φορτίου που ανήκει στον λιμένα και γενικότερα όσες εκπομπές προέρχονται από τον διαχειριστικό φορέα του λιμένα.

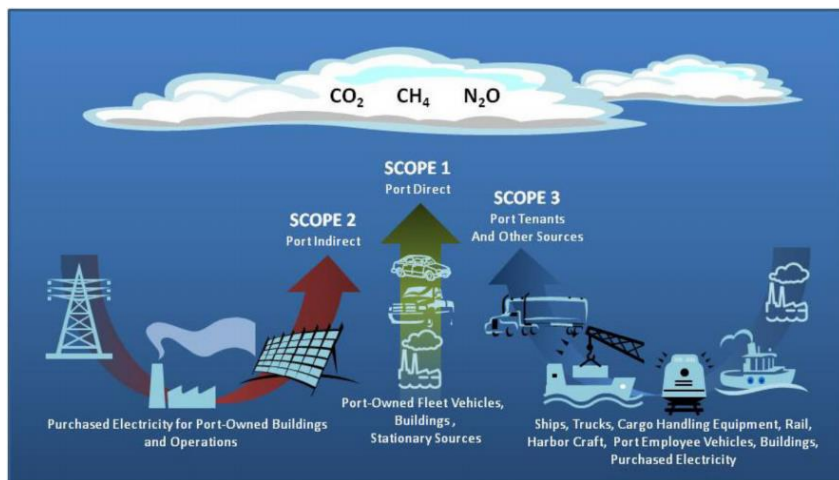
2^ο Πεδίο (Scope 2) – Έμμεσες Πηγές

Οι εκπομπές αυτές αναφέρονται στις έμμεσες εκπομπές από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία καταναλώνεται στις λιμενικές εγκαταστάσεις, από τον διαχειριστικό φορέα.

3^ο Πεδίο (Scope 3) – Άλλες Έμμεσες Πηγές

Αυτές οι εκπομπές προέρχονται από τις υπόλοιπες δραστηριότητες εντός του λιμένα που δεν εφάπτονται του διαχειριστικού φορέα. Περιλαμβάνονται εκπομπές από πλοία, φορτηγά, εξοπλισμό διακίνησης φορτίου, λιμενικά σκάφη και από τις μετακινήσεις των υπαλλήλων του λιμένα, όπως I.X., M.M.M..

Τα παραπάνω πεδία απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα.



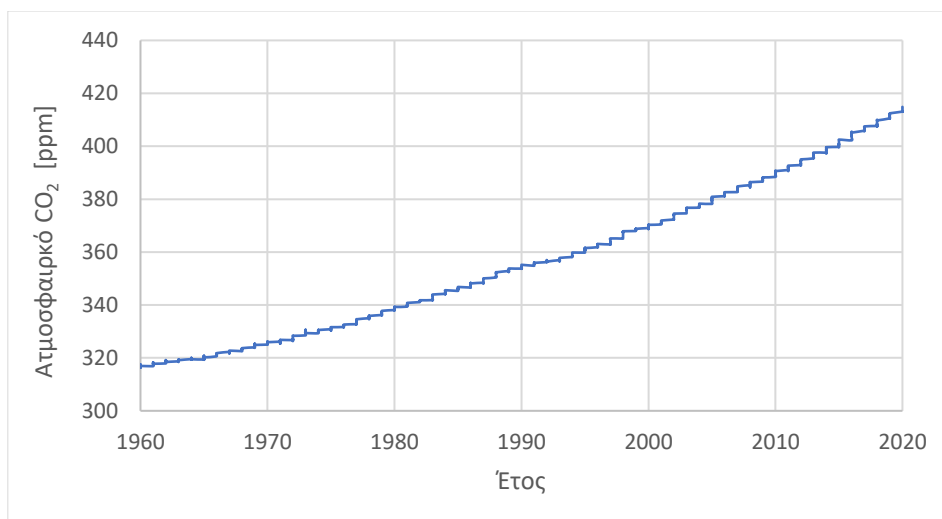
Εικόνα 1 Πηγές εκπομπών ρύπων σε λιμένες

2.4. Εκπομπές στους Λιμένες

Οι ναυτικοί κινητήρες Diesel είναι ο επικρατέστερος τύπος μηχανής στη ναυτιλία. Η πλειονότητα των ποντοπόρων φορτηγών πλοίων λειτουργεί με μεγάλους δίχρονους κινητήρες χαμηλών και μεσαίων στροφών, οι οποίοι έχουν ένα τυπικό βαθμό μηχανικής απόδοσης περίπου 50%. Στο θάλαμο καύσης ενός κινητήρα Diesel, χημικές διεργασίες πραγματοποιούνται ώστε από το μίγμα καυσίμου-αέρα να απελευθερωθεί θερμική ενέργεια. Με την καύση, εκτός από την ενέργεια που απελευθερώνεται, δημιουργείται και ένα μίγμα αερίων. Στο μίγμα αέρα καυσίμου, εκτός από τους υδρογονάνθρακες και το οξυγόνο που είναι απαραίτητα για την καύση, υπάρχουν και άλλα στοιχεία, όπως άζωτο από τον αέρα και θείο από το καύσιμο. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα, το μίγμα των καυσαερίων που παράγεται να αποτελείται από διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), οξείδια του θείου (SO_x) και του αζώτου (NO_x), καθώς και σωματίδια (PM₁₀, PM_{2.5}). Κατά τη διάρκεια φόρτωσης δεξαμενοπλοίων, η εξάτμιση οδηγεί σε πρόσθετες εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC). Τα κύρια προϊόντα και παραπροϊόντα της καύσης αναφέρονται παρακάτω.

Διοξείδιο του Άνθρακα (CO₂)

Αυτό το αέριο, είναι συστατικό της γήινης ατμόσφαιρας. Όμως, το CO₂ που εκπέμπεται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, επηρεάζει την σύσταση της ατμόσφαιρας, προκαλώντας προβλήματα, όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Το διοξείδιο του άνθρακα αποτελεί το βασικό αέριο του θερμοκηπίου, μαζί με το μεθάνιο (CH₄) και το υποξείδιο του αζώτου (N₂O). Πριν από τη βιομηχανική επανάσταση, η ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα ήταν περίπου 280 ppm και έκτοτε αυξήθηκε σε πάνω από 400 ppm από τα μέσα του 2015 και έπειτα. Η συγκέντρωση CO₂ στην ατμόσφαιρα εξακολουθεί να αυξάνεται την τελευταία δεκαετία με επιπρόσθετο ρυθμό αύξησης 2.3 ppm ανά έτος [8]. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, παγκοσμίως, από την καύση ορυκτών καυσίμων έφτασαν σε ιστορικά υψηλότερο επίπεδο το 2018 με τιμή 33.5 Gt CO₂ [9].



Γράφημα 1 Μηνιαίος μέσος όρος συγκέντρωσης CO₂²

Οξειδία του Αζώτου (NO_x)

Ως NO_x αναφέρονται οι διάφορες ενώσεις αζώτου και οξυγόνου. Σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, όπως αυτές κατά τη διάρκεια της καύσης, ευνοούνται οι σχηματισμοί τέτοιων οξειδίων. Τα οξειδία του αζώτου αντιδρώντας με την υγρασία σχηματίζουν νιτρικό οξύ (HNO₃). Μεγάλες συγκεντρώσεις οξειδίων του αζώτου, αλλά και σωματιδίων ατμού νιτρικού οξέος επηρεάζουν τόσο τον άνθρωπο, όσο και το περιβάλλον.

Οξειδία του Θείου (SO_x)

Ως SO_x αναφέρονται οι διάφορες ενώσεις θείου και οξυγόνου. Η ποσότητα των εκλυόμενων οξειδίων του θείου συνδέεται άμεσα με την περιεκτικότητα σε θείο του καυσίμου. Το θείο που περιέχουν τα καύσιμα οξειδώνεται κατά τη διάρκεια της καύσης στη μηχανή σε οξειδία του θείου, κυρίως SO₂ και SO₃. Το SO₃ αντιδρά με την υγρασία (H₂O) και δημιουργεί σωματίδια θειικού οξέος (H₂SO₄) μικροσκοπικού μεγέθους που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα (αερολύματα). Ο κλάδος της ναυτιλίας βρίσκεται μεταξύ των κορυφαίων εκπομπών SO_x. Τα οξειδία του θείου επηρεάζουν τον ανθρώπινο οργανισμό, αλλά και το φυσικό περιβάλλον. Επίσης, συνεισφέρουν στο φαινόμενο της όξινης βροχής.

Αιωρούμενα Σωματίδια (PM)

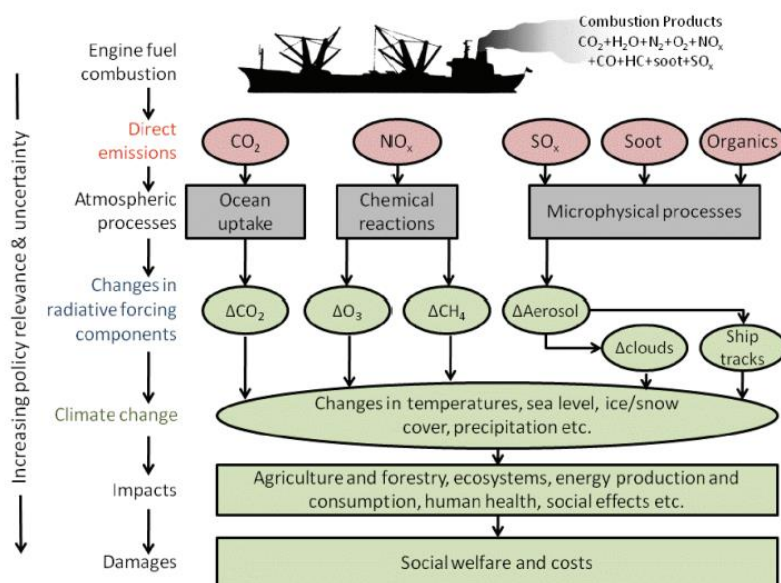
Τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν ένα σύνθετο μίγμα οργανικών και ανόργανων ουσιών και περιλαμβάνουν ατομικό άνθρακα, αιθάλη (soot), στάχτη, πολύ μικρά σωματίδια καυσίμου που δεν κάηκε ή κάηκε ατελώς, άκαυστο λιπαντικό έλαιο, θειικά και υγρασία. Τα αιωρούμενα σωματίδια επηρεάζουν τον ανθρώπινο οργανισμό, καθώς και το περιβάλλον. Το μέγεθος τους δεν είναι συγκεκριμένο, αλλά η διαφορετική επικινδυνότητα των σωματιδίων ανάλογα με την διάμετρο τους, οδήγησε στον διαχωρισμό τους σε σωματίδια PM₁₀ (εισπνεόμενα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 10 μm) και σε σωματίδια PM_{2.5}.

Πτητικές Οργανικές Ενώσεις (VOC)

Ως πτητικές οργανικές ενώσεις νοούνται μίγματα ελαφρών υδρογονανθράκων (μεθάνιο έως οκτάνιο) που διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα κυρίως κατά τη φόρτωση δεξαμενοπλοίων με αργό πετρέλαιο και προϊόντα του. Στα παραπάνω μπορεί να υπάρχει αδρανές αέριο, υδρόθειο και άλλες

² NOAA Mauna Loa Observatory Hawai'i

ανόργανες ενώσεις. Το μεθάνιο (CH_4) αποτελεί αέριο που συντελεί στο φαινόμενο του θερμοκηπίου σε βαθμό πολλαπλάσιο σε σχέση με το CO_2 , ενώ βαρύτερα αέρια όπως το προπάνιο και το βουτάνιο συντελούν στη δημιουργία όζοντος χαμηλά στην ατμόσφαιρα που είναι επιβλαβές για την ανθρώπινη υγεία [10].



Εικόνα 2 Σχηματικό διάγραμμα των επιπτώσεων των εκπομπών αέριων ρύπων από την ναυτιλία

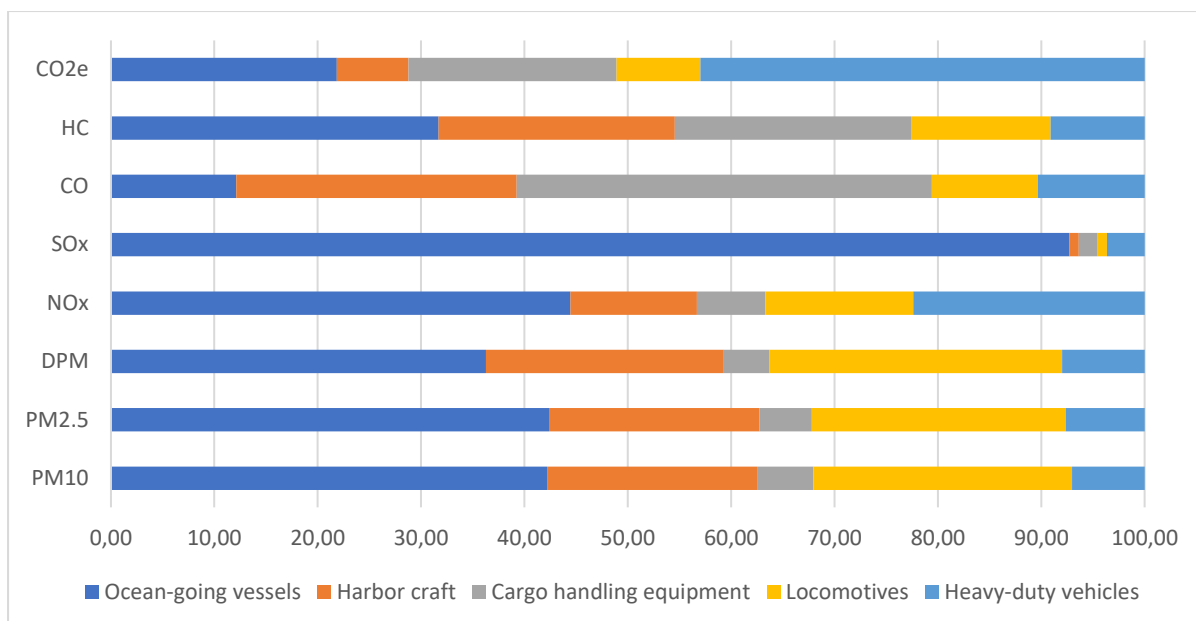
Εκτός από τις εκπομπές λόγω καύσης πετρελαίου από την κύρια μηχανή των πλοίων, έχουν αναφερθεί και παραπάνω πηγαίως εκπομπών στο λιμάνι. Μέσα σε αυτές συγκαταλέγεται η λειτουργία των βοηθητικών μηχανών των πλοίων στον χώρο του λιμένα. Στον χώρο των λιμένων, εκτός από τους παραπάνω ρύπους και αέρια, συναντώνται όζον (O_3) και μόλυβδος (Pb) [11].

Όζον (O_3)

Το όζον αποτελεί κύριο συστατικό της φωτοχημικής αιθαλομίχλης (αστικό νέφος, smog). Είναι δευτερογενής ρύπος και δημιουργείται κυρίως από τα NO_x και VOCs υπό την παρουσία ηλιακής ακτινοβολίας, υπεριώδους ακτινοβολίας (UV).

Αν και οι εκπομπές εντός των λιμένων αποτελούν ένα μικρό ποσοστό των συνολικών εκπομπών στην ναυτιλία, στα λιμάνια συναντάται σημαντική συγκέντρωση πλοίων, με αποτέλεσμα να φορτίζονται με μεγάλο φορτίο αέριων ρύπων. Επομένως, η τοπική κοινωνία έρχεται αντιμέτωπη με το κόστος αυτών των εκπομπών τόσο στην ποιότητα ζωής, όσο και στο περιβάλλον.

Αφού έχει γίνει αναφορά στις πηγαίως εκπομπών εντός του λιμένα και στις εκπομπές ακολουθεί ένα γράφημα από την μελέτη του Λιμένα του Los Angeles για το έτος 2019 [12] (Port of Los Angeles – POLA, 2020) όπου παρουσιάζεται η συμβολή κάθε πηγής εκπομπών στα είδη των ρυπαντών και αερίων.



Γράφημα 2 Κατανομή εκπομπών στο Λιμάνι του Los Angeles

Στο Γράφημα 2, φαίνεται ότι για την πλειονότητα των εκπομπών (HC, SO_x, NO_x, DPM³, PM_{2.5}, PM₁₀) ευθύνονται τα πλοία που προσεγγίζουν τον λιμένα. Ωστόσο, για το μονοξειδίο του άνθρακα (CO) το μεγαλύτερο ποσοστό εκπομπών αντιστοιχεί στον εξοπλισμό διαχείρισης φορτίου, ενώ για τα αέρια του θερμοκηπίου, που εδώ παρουσιάζονται με το ισοδύναμο του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂e)⁴, κύριος υπεύθυνος είναι τα βαρέα φορτηγά οχήματα.

³ Diesel Particulate Matter

⁴ Το ισοδύναμο του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂e) επιτρέπει τα διαφορετικά αέρια του θερμοκηπίου να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους σε μία βάση υπολογισμού η οποία ως μονάδα μέτρησης έχει τη μία μονάδα διοξειδίου του άνθρακα (CO₂).

3. Οργάνωση και Λειτουργία Λιμένων

3.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το σημείο θεωρείται σκόπιμο να γίνει εκτενέστερη αναφορά στο 2^ο κεφάλαιο του εγγράφου της ΙΑΡΗ σχετικά με τους ρύπους στους λιμένες και συγκεκριμένα στο πρώτο μέρος, όπου γίνεται ανάλυση στο πως επηρεάζει το καθεστώς ιδιοκτησίας και οργάνωσης του λιμένα και των εγκαταστάσεων του, τον προσδιορισμό των εκπεμπόμενων ρύπων. Η διάκριση που γίνεται είναι καθοριστική για το ποιος είναι ο φορέας, λιμένας ή εξωτερικός διαχειριστικός φορέας, που είναι υπεύθυνος για τις λειτουργίες και δραστηριότητες του λιμανιού, και κατ' επέκταση από ποιον φορέα μπορούν να αντληθούν οι πληροφορίες για μία ολοκληρωμένη μελέτη σχετικά με τις δραστηριότητες στον χώρο του λιμένα.

3.2. Ορισμός και Χαρακτηριστικά των Λιμένων

Ως λιμένες ορίζονται περιοχές παράκτιες, σε θάλασσα ή ποταμό, που συνδέουν θαλάσσιες οδούς καθώς και τη θάλασσα με τη στεριά, λειτουργώντας ως διατροφικοί κόμβοι. Η σχεδίαση τους, σε βοήθεια με το φυσικό περιβάλλον, έχει ως στόχο να αποτελούν ασφαλή «καταφύγια» για τα πλοία, για να επιτελούν το μεταφορικό τους έργο, ενώ λειτουργούν και ως σταθμοί ανεφοδιασμού. Τα λιμάνια μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως προς τον αριθμό και τον τύπο πλοίων που μπορούν να εξυπηρετήσουν αλλά και ως προς τις μεγαλύτερες διαστάσεις πλοίου που μπορεί να τα προσεγγίσει. Με στόχο την επαρκή λειτουργία κάθε λιμένα, υπάρχουν τρεις προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται [13]:

- Ασφαλής και προσβάσιμη είσοδος από την θάλασσα (“front” door),
- Επαρκείς συνδέσεις με την ενδοχώρα, οδικές, σιδηροδρομικές συνδέσεις ή αγωγοί, ανάλογα με τον τύπο του λιμένα (“back” door),
- Επαρκής χωρητικότητα, εξοπλισμός διαχείρισης και αποθήκευσης φορτίου, καθώς και χώρος για τον ελλιμενισμό και τους ελιγμούς των πλοίων.

Η ατμοσφαιρική ρύπανση στα λιμάνια έχει τοπικές και παγκόσμιες συνέπειες. Οι προσπάθειες για τον περιορισμό των εκπεμπόμενων ρύπων γίνεται σε παγκόσμιο επίπεδο από διεθνείς οργανισμούς, και σε τοπικό επίπεδο από τις λιμενικές αρχές. Παρακάτω παρουσιάζονται, οι κύριοι τύποι μοντέλων διαχείρισης λιμένων, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, όπου ανάλογα με τον τύπο λιμένα μπορεί να επηρεαστεί η εφαρμογή περιβαλλοντικών κανονισμών.

3.3. Οργάνωση των Λιμένων

Η οργάνωση των λιμένων διαφέρει στους δημόσιους και στους ιδιωτικούς, που μπορεί να έχουν και διαφορετικό σκοπό χρήσης. Σε αυτό το σημείο μπορεί να δοθεί ο ορισμός της λιμενικής αρχής⁵,

⁵ Ως “λιμενική αρχή” μεταφράζεται στην παρούσα εργασία η έκφραση “port authority” καθώς χρησιμοποιείται αδιακρίτως, χωρίς εννοιολογική διαφοροποίηση, με τη “διαχειρίστρια εταιρεία”.

όπως ορίζεται από την Ευρωπαϊκή Ένωση, ως «Κρατικός, δημοτικός, δημόσιος ή ιδιωτικός φορέας που είναι κύριος υπεύθυνος για έργα κατασκευής, τη διοίκηση και κάποιες φορές τη λειτουργία των λιμένων, και σε ορισμένες περιπτώσεις για την ασφάλεια» [14]. Τα κύρια μοντέλα διαχείρισης λιμένων παρουσιάζονται στη συνέχεια, αλλά ανεξάρτητα με το τύπο διαχείρισης, οι διεθνείς και εθνικοί περιβαλλοντικοί κανονισμοί πρέπει να τηρούνται.

3.3.1. Δημόσια Λιμάνια

Αρχικά, τα λιμάνια εντασσόταν στο δημόσιο φορέα της εκάστοτε χώρας, δηλαδή ήταν δημόσιοι οργανισμοί. Ο ρόλος της δημόσιας λιμενικής αρχής είναι να δημιουργήσει τη βασική υποδομή, να ρυθμίσει τους κανονισμούς του λιμένα και να παρέχει ασφάλεια σε ένα περιβάλλον θεμιτού ανταγωνισμού προς όφελος του δημοσίου συμφέροντος [15]. Στα πλαίσια της ποσοτικοποίησης των αερίων του θερμοκηπίου, η Διεθνής Ένωση Λιμένων (International Association of Ports and Harbors – IAPH) [7] διαχωρίζει τα δημόσια λιμάνια σε δύο τύπους.

Λιμένας «Ιδιοκτήτης γης» - Landlord Port

Σε αυτό το μοντέλο διαχείρισης, συνυπάρχουν δημόσιοι και ιδιωτικοί φορείς. Η λιμενική αρχή αναλαμβάνει τον ρόλο ενός ρυθμιστικού φορέα, που κατέχει την περιοχή του λιμένα και παρέχει σε ιδιωτικούς φορείς τη δυνατότητα, μέσω συμβάσεων, διαχείρισης και αποθήκευσης του φορτίου. Η λιμενική αρχή είναι υπεύθυνη για τις υποδομές, την ασφάλεια των πλοίων και την πρόσβαση τους στον λιμένα. Ο εξοπλισμός των τερματικών, συνήθως αγοράζεται από τον ιδιωτικό φορέα που έχει εκμισθώσει τον χώρο. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται μια SWOT ανάλυση του παραπάνω μοντέλου [16].

Πίνακας 1 SWOT ανάλυση λιμένα ιδιοκτήτη

Strengths
<ul style="list-style-type: none"> • Οι ιδιωτικές εταιρείες διαχείρισης φορτίου μπορούν να ανταπεξέρχονται στις απαιτήσεις της αγοράς
Weaknesses
<ul style="list-style-type: none"> • Περιορισμένοι δημόσιοι πόροι για επενδύσεις
Opportunities
<ul style="list-style-type: none"> • Οι μακροπρόθεσμες συμβάσεις εκμίσθωσης των τερματικών προτρέπουν τους ιδιωτικούς φορείς να προχωρήσουν σε μεγαλύτερες επενδύσεις λιμένα
Threats
<ul style="list-style-type: none"> • Κίνδυνος εσφαλμένης εκτίμησης του χρονοδιαγράμματος για την αύξηση της χωρητικότητας • Κίνδυνος για πλεονάζουσα ικανότητα του λιμένα

«Λειτουργικός» Λιμένας – Operating Port

Το μοντέλο του λειτουργικού λιμένα έχει κυρίως δημόσιο χαρακτήρα. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, η λιμενική αρχή κατέχει όλα τα κινητά και πάγια στοιχεία του λιμένα και προσφέρει τις υπηρεσίες που απαιτούνται για τη λειτουργία των λιμένων, συχνά συμπεριλαμβανομένου και τη διαχείριση και αποθήκευση του φορτίου. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται μια SWOT ανάλυση του παραπάνω μοντέλου [16].

Πίνακας 2 SWOT ανάλυση λειτουργικού λιμένα

Strengths
<ul style="list-style-type: none"> • Η ανάπτυξη των υποδομών και των λειτουργιών είναι υπό την ευθύνη του ίδιου οργανισμού
Weaknesses
<ul style="list-style-type: none"> • Έλλειψη εσωτερικού ανταγωνισμού • Καμία συμμετοχή του ιδιωτικού τομέα
Opportunities
<ul style="list-style-type: none"> • Η λιμενική αρχή μπορεί να επικεντρωθεί στις περιβαλλοντικές πτυχές της λειτουργίας του λιμένα, εξαιτίας της δημόσιας φύσης του
Threats
<ul style="list-style-type: none"> • Πιθανή ελλιπή χρηματοδότηση από τον κρατικό προϋπολογισμό

3.3.2. Ιδιωτικά Λιμάνια

Στα πλήρως ιδιωτικοποιημένα λιμάνια το κράτος δεν έχει καμία συμμετοχή στη λειτουργία του. Συνηθίζεται λιμάνια να ιδιωτικοποιούνται για την επίτευξη δημοσιονομικών στόχων της εκάστοτε χώρας, αλλά και για την αναβάθμιση τους, όταν το κράτος αδυνατεί. Κάποια μειονεκτήματα αυτού του μοντέλου είναι, ο κίνδυνος που ελλοχεύει να πωληθεί η περιοχή του λιμένα για μη λιμενικές δραστηριότητες, με αποτέλεσμα να χαθεί ένας κόμβος μεταφοράς, καθώς και η πιθανότητα δημιουργίας μονοπωλίου. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται μια SWOT ανάλυση του παραπάνω μοντέλου [16].

Πίνακας 3 SWOT ανάλυση ιδιωτικού λιμένα

Strengths
<ul style="list-style-type: none"> • Ευελιξία στις επενδύσεις και τις λιμενικές δραστηριότητες
Weaknesses
<ul style="list-style-type: none"> • Η κυβέρνηση δεν δύναται να αναπτύσσει μακροπρόθεσμες οικονομικές πολιτικές για την λειτουργία του λιμένα • Κίνδυνος κερδοσκοπίας επί του λιμενικού εδάφους
Opportunities
<ul style="list-style-type: none"> • Πιθανή ανάπτυξη πολιτικών τιμολόγησης προσανατολισμένες προς την αγορά • Υιοθέτηση περιβαλλοντικών διατάξεων
Threats
<ul style="list-style-type: none"> • Πιθανότητα δημιουργίας μονοπωλίου • Κίνδυνος παύσης των λιμενικών δραστηριοτήτων

3.3.3. Τερματικά Λιμένων

Ένας τερματικός σταθμός είναι μία εγκατάσταση εντός του λιμένα που παρέχει θέσεις ελλιμενισμού για τα πλοία ώστε να γίνει η διαχείριση του φορτίου τους. Συνήθως τα λιμάνια έχουν διαφορετικούς τερματικούς σταθμούς ανάλογα με το είδος και το μέγεθος τους [17] Τα κύρια χαρακτηριστικά κάθε τερματικού σταθμού είναι οι υποδομές στη θάλασσα και στη στεριά, οι κτιριακές υποδομές, ο εξοπλισμός διαχείρισης φορτίου και το ανθρώπινο προσωπικό. Τα κύρια είδη τερματικών σταθμών κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Τερματικά επιβατηγών πλοίων
- Τερματικά (επιβατηγών) οχηματαγωγών πλοίων
- Τερματικά υγρού φορτίου
- Τερματικά φορτίου χύδην
- Τερματικά εμπορευματοκιβωτίων
- Τερματικά πολλαπλών χρήσεων

Οι συνήθεις υπηρεσίες κάθε τερματικού σταθμού είναι η φόρτωση και η εκφόρτωση των πλοίων, η προσωρινή αποθήκευση του φορτίου και η φόρτωση και εκφόρτωση για το επόμενο στάδιο μεταφοράς.

Στους τερματικούς σταθμούς, από περιβαλλοντικής πλευράς, ανακύπτουν τα ακόλουθα ζητήματα. Τα μεγαλύτερα πλοία θεωρούνται αποδοτικότερα ανά τόνο φορτίου ως προς τους εκπεμπόμενους ρύπους, αλλά κάθε κλήση στον λιμένα ενός μεγάλου πλοίου εκπέμπει περισσότερους ρύπους εξαιτίας των ενεργειακών απαιτήσεων του και της μεγαλύτερης διάρκειας παραμονής του στο αγκυροβόλιο. Επίσης, τα μεγάλα πλοία χρησιμοποιούν περισσότερο εξοπλισμό διαχείρισης φορτίου, αυξάνοντας την ενέργεια που απαιτείται. Βέβαια, η χρήση περισσότερου εξοπλισμού διαχείρισης φορτίου, ενώ αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας του λιμένα, μειώνει τις εκπομπές από το πλοίο, αφού το πλοίο χρειάζεται λιγότερο χρόνο στο λιμάνι.

4. Νομοθεσία και Κανονισμοί

4.1. Εισαγωγή

Σύμφωνα με την ανάλυση του Κεφαλαίου 2 έχει γίνει αντιληπτό ότι πόλεις-λιμάνια και παράκτιες περιοχές αντιμετωπίζουν οξυμένη αστική ρύπανση από τις εκπομπές των πλοίων και η τοπική κοινωνία έρχεται αντιμέτωπη με το κόστος αυτών των εκπομπών που επηρεάζουν τόσο την ποιότητα ζωής, όσο και το περιβάλλον. Επομένως, η ανάγκη για έλεγχο των αέριων ρύπων και περιορισμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, γενικά στη ναυτιλία, αλλά και ειδικά στις παράκτιες περιοχές είναι επιτακτική ανάγκη. Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρονται τα νομοθετικά πλαίσια, τόσο σε διεθνές, όσο και σε κρατικό επίπεδο, που έχουν θεσμοθετηθεί για την καταπολέμηση του φαινομένου. Η σχετική νομοθεσία και οι κανονισμοί αποτελούν ένα δυναμικό σύστημα το οποίο αλλάζει και μεταβάλλεται με την πάροδο των χρόνων και την εξέλιξη της τεχνολογίας, με σκοπό την βέλτιστη αντιμετώπιση του προβλήματος.

Κανονισμοί διεθνών οργανισμών όπως η Ευρωπαϊκή Ένωση και ο ΙΜΟ, καθώς και η νομοθεσία μεμονωμένων κρατών καθορίζουν το πλαίσιο εντός του οποίου πραγματοποιούνται οι ναυτιλιακές δραστηριότητες. Η λειτουργία των πλοίων θα πρέπει να είναι σύμφωνη με τους κανονισμούς της σημαίας τους (flag state control), αλλά και του κάθε λιμένα που μπορεί να βρεθούν (port state control).

4.2. Διεθνής Νομοθεσία

Στην διεθνή νομοθεσία για την προστασία του περιβάλλοντος από την ναυτιλία, συμπεριλαμβάνονται η Διεθνής Σύμβαση MARPOL, 1973 (MARPOL 73/78) και το Πρωτόκολλο του Κιότο, 1997, η Συμφωνία του Παρισιού κατά τη Διάσκεψη για την Κλιματική Αλλαγή(2015)⁶. Παρακάτω, γίνεται εκτενής αναφορά στην Διεθνή Σύμβαση MARPOL 73/78, καθώς και στους κανονισμούς που ισχύουν αυτή την στιγμή στην Ευρωπαϊκή Ένωση για την προστασία του περιβάλλοντος.

4.2.1. Διεθνής Σύμβαση MARPOL 73/78

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (ΙΜΟ) είναι ένας εξειδικευμένος οργανισμός των Ηνωμένων Εθνών, του οποίου κύριο καθήκον είναι η βελτίωση της ασφάλειας και προστασίας της διεθνούς ναυτιλίας και η πρόληψη της προερχόμενης από τα πλοία ρύπανσης.

Για την πρόληψη της ρύπανσης από την ναυτιλία, υιοθετήθηκε από τον ΙΜΟ η σύμβαση MARPOL (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, Διεθνής Σύμβαση για την Πρόληψη της Θαλάσσιας Ρύπανσης από Πλοία). Η σύμβαση περιλαμβάνει κανονισμούς που

⁶ Για βιβλιογραφική πληρότητα, αναφέρεται ότι υπάρχουν κανονισμοί, οι οποίοι αφορούν τον κλάδο των μεταφορών στο σύνολο του, όπως η Λευκή Βίβλος (2011, EU) και η Συμφωνία του Παρισιού (2015, UN), και άλλοι, οι οποίοι στην παρούσα εργασία δεν αναλύονται περαιτέρω.

στοχεύουν στην πρόληψη και ελαχιστοποίηση της ρύπανσης από τα πλοία – τόσο της ακούσιας ρύπανσης όσο και από συνήθεις πρακτικές - και περιλαμβάνει έξι Παραρτήματα. Από αυτά, το Παράρτημα VI (τέθηκε σε ισχύ στις 19 Μαΐου 2005) αφορά την πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα πλοία [18].

MARPOL 73/78 Παράρτημα VI

Στο Παράρτημα VI περιλαμβάνονται οι παρακάτω κανονισμοί:

- Κανονισμός 12 – Εκπομπές ουσιών που καταστρέφουν το όζον από ψυκτικές εγκαταστάσεις και εξοπλισμό πυρόσβεσης,
- Κανονισμός 13 – Εκπομπές οξειδίων αζώτου (NO_x) από κινητήρες Diesel,
- Κανονισμός 14 – Εκπομπές οξειδίων θείου (SO_x) από πλοία,
- Κανονισμός 15 – Εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων από δεξαμενές πετρελαίου πετρελαιοφόρων,
- Κανονισμός 16 – Εκπομπές από αποτεφρωτήρες πλοίων,
- Κανονισμός 18 – Ποιότητα μαζούτ

Στα πλαίσια αυτού του Παραρτήματος, καθορίζονται οι περιοχές ελεγχόμενης εκπομπής – ECA (Emission Control Area), για εκπομπές οξειδίων αζώτου (NO_x) και οξειδίων θείου (SO_x).

4.2.2. Ευρωπαϊκή Νομοθεσία

Η δράση για το κλίμα στην Ευρωπαϊκή Ένωση συντάσσεται με τους στόχους του πρωτοκόλλου του Κιότο (1997), το οποίο αποτελεί την πρώτη νομικά δεσμευτική συμφωνία για μειώσεις εκπομπών, και τη δράση των Ηνωμένων Εθνών. Οι κανονισμοί της MARPOL 73/78 για τους αέριους ρύπους από τη ναυτιλία υιοθετούνται στην ισχύουσα ευρωπαϊκή νομοθεσία στις παρακάτω τρεις διατάξεις:

- Κανονισμός (ΕΕ) 2015/757 (Regulation 2015/757), για την παρακολούθηση, την υποβολή εκθέσεων και επαλήθευση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από θαλάσσιες μεταφορές και για την τροποποίηση της οδηγίας 2009/16/ΕΚ,
- Εκτελεστική απόφαση (ΕΕ) 2015/253, (Commission implementing decision 2015/253), για τον καθορισμό των κανόνων σχετικά με τη δειγματοληψία και την υποβολή εκθέσεων στο πλαίσιο της οδηγίας 1999/32/ΕΚ του Συμβουλίου όσον αφορά την περιεκτικότητα των καυσίμων πλοίων σε θείο,
- Οδηγία (ΕΕ) 2016/802 (Directive 2016/802), σχετικά με τη μείωση της περιεκτικότητας ορισμένων υγρών καυσίμων σε θείο.

4.3. Ελληνική Νομοθεσία

Η ελληνική νομοθεσία είναι εναρμονισμένη με τις ευρωπαϊκές διατάξεις και την MARPOL 73/78. Οι αποφάσεις που ισχύουν είναι οι εξής:

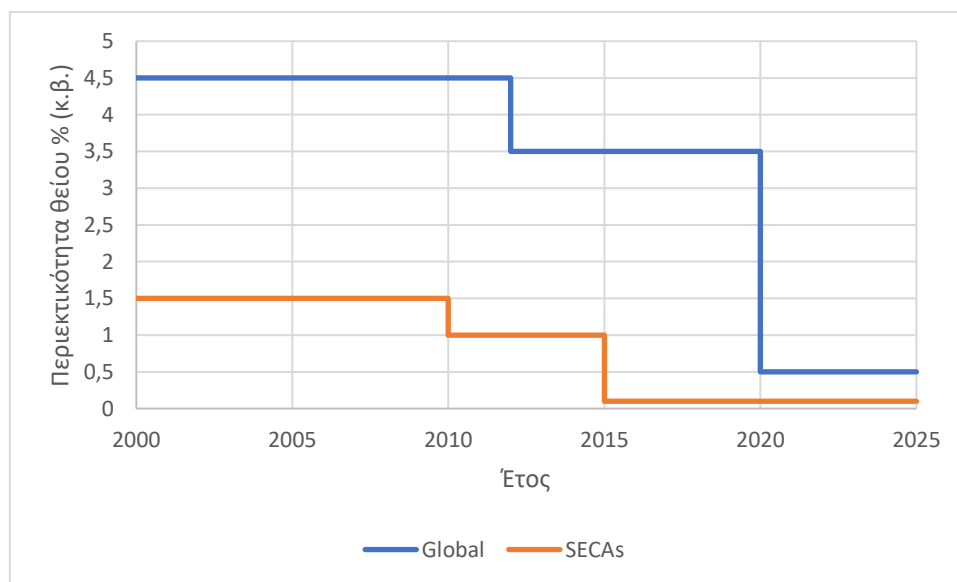
- Κ.Υ.Α. 128/2016 – ΦΕΚ 395/Β/9-12-2016, Εναρμόνιση της Ελληνικής Νομοθεσίας προς την Οδηγία (ΕΕ) 2016/802 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του συμβουλίου της 11^{ης} Μαΐου 2016 «σχετικά με τη μείωση της περιεκτικότητας ορισμένων υγρών καυσίμων σε θείο»,
- Εγκ. 2261.4-4/39001/2020 (ΦΕΚ / -- 24.6.2020), Εφαρμογή, ως συμβαλλόμενο κράτος της MARPOL 73/78, των απαιτήσεων όλων των Παραρτημάτων της εν λόγω Σύμβασης, συμπεριλαμβανομένου και του αναθεωρημένου Παραρτήματος VI,
- Εφαρμογή της Εκτελεστικής απόφασης (ΕΕ) 2015/253,
- Εφαρμογή του Κανονισμού (ΕΕ) 2015/757.

4.4. Ισχύοντα Μέτρα για τις Εκπομπές από την Ναυτιλία

Παρακάτω αναφέρονται τα μέτρα που έχουν θεσμοθετηθεί για την μείωση των εκπομπών⁷ από τα πλοία. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η επίτευξη αυτών των στόχων μπορεί να συμβεί και με τεχνολογίες μείωσης των ρύπων, οι οποίες έχουν το επιθυμητό αποτέλεσμα εκπομπών.

Οξειδία του θείου (SO_x)

Σχετικά με τα οξειδία του θείου, από τον Ιανουάριο του 2020 τέθηκε σε ισχύ το Sulphur Cap, το οποίο είχε προταθεί από τον IMO και ορίζει ότι η περιεκτικότητα σε θείο των καυσίμων που χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία πρέπει να είναι ίση με 0.50% (κ.β.), και στις περιοχές SECA (Sulphur Emission Control Area, Περιοχές Ελεγχόμενων Ρύπων Θείου) [19] ίση με 0.10% (κ.β.), όπως ισχύει από τον Ιανουάριο του 2015. Αυτοί οι περιορισμοί στην περιεκτικότητα του θείου στα καύσιμα ναυτιλίας τέθηκαν σταδιακά από το 2010 και έπειτα⁸.



Γράφημα 3 Όρια περιεκτικότητας σε θείο

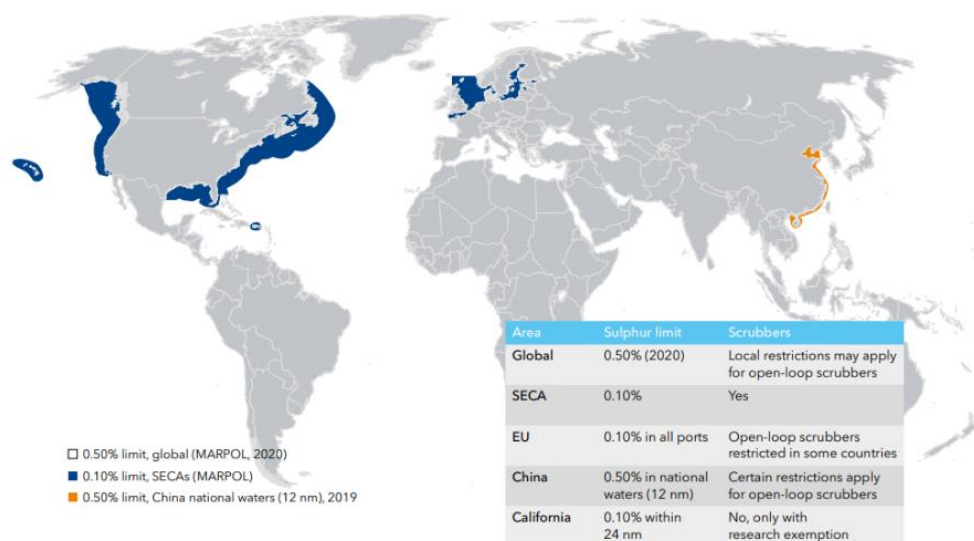
⁷ Για βιβλιογραφική πληρότητα, αξίζει να σημειωθεί ότι στην παρούσα εργασία δεν συμπεριλαμβάνονται τα Market Based μέτρα, όπως για παράδειγμα το Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Emission Trading System – EU ETS)

⁸ MARPOL Reg. 14

Στις περιοχές ελέγχου των εκπομπών θείου ανήκουν οι Βαλτική Θάλασσα, η Βόρεια Θάλασσα, η θάλασσα στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής, καθώς και η Θάλασσα της Καραϊβικής.

Εκτός από τους περιορισμούς του IMO, που είναι σε παγκόσμια κλίμακα, ανά περιοχές ισχύουν αυστηρότεροι κανονισμοί. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, σύμφωνα με την Οδηγία (ΕΕ) 2016/802, στο Άρθρο 7 ορίζεται η μέγιστη περιεκτικότητα σε θείο των καυσίμων πλοίων που χρησιμοποιούνται από σκάφη ελλιμενισμένα σε λιμένες της Ε.Ε. σε 0.10% (κ.β.). Αυτό το όριο δεν ισχύει στις εξής περιπτώσεις:

1. Όταν, σύμφωνα με τα δημοσιευμένα προγράμματα δρομολογίων, τα πλοία αναμένεται να παραμείνουν ελλιμενισμένα για διάστημα μικρότερο από δύο ώρες,
2. Στα πλοία που, κατά τη διάρκεια του ελλιμενισμού τους, διακόπτουν τη λειτουργία όλων των μηχανών και τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια από την ξηρά.



Εικόνα 3 Τοπικά και παγκόσμια όρια θείου

Οξειδία του αζώτου (NO_x)⁹

Σύμφωνα με τον Κανονισμό 13 της MARPOL 73/78, καθορίζονται οι ανώτατες ποσότητες οξειδίων του αζώτου τις οποίες επιτρέπεται να εκπέμπει ένα πλοίο ανά kWh. Οι ποσότητες εξαρτώνται από την ονομαστική ταχύτητα του κινητήρα και το έτος κατασκευής του πλοίου. Υπάρχουν τρία διαφορετικά επίπεδα εκπομπών, τα Tier I-III, όπως φαίνονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4 Όρια στις εκπομπές NO_x

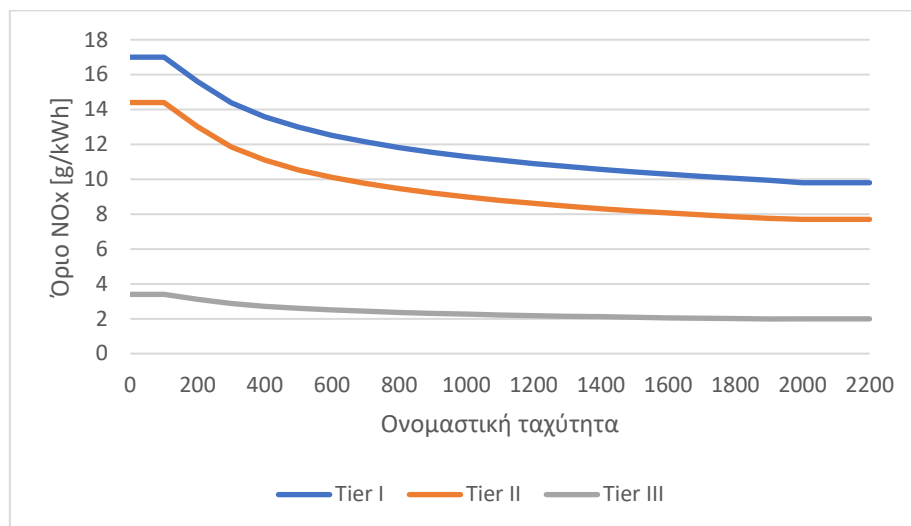
Tier	Έτος κατασκευής πλοίου και έπειτα	Όριο εκπομπών [g/kWh]		
		n < 130 [rpm]	n = 130 – 1999 [rpm]	n ≥ 2000
I	1 Ιανουαρίου 2000	17.0	$45n^{(-0.2)}$	9.8
II	1 Ιανουαρίου 2011	14.4	$44n^{(-0.23)}$	7.7
III	1 Ιανουαρίου 2016	3.4	$9n^{(-0.2)}$	2.0

Τα όρια Tier III ισχύουν μόνο στις περιοχές ελεγχόμενης εκπομπής ρύπων αζώτου (NO_x Emission Control Areas – NECAs). Σε αυτές τις περιοχές ανήκουν από το 2016 η θάλασσα στην περιοχή της

⁹ MARPOL Reg. 13

Βόρειας Αμερικής, καθώς και η Θάλασσα της Καραϊβικής. Ενώ από την 1 Ιανουαρίου 2021 θα ενταχθούν η Βαλτική Θάλασσα και η Βόρεια Θάλασσα.

Την παρούσα χρονική στιγμή, δεν υπάρχει κάποια πρόσθετη Ευρωπαϊκή νομοθεσία σχετικά με τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου.



Γράφημα 4 Όριο εκπομπών οξειδίων αζώτου

Αέρια του θερμοκηπίου (GHG)

Από την 1^η Ιανουαρίου 2013 έχουν τεθεί σε ισχύ οι προβλέψεις του Κεφαλαίου 4 του Παραρτήματος VI της MARPOL 73/78 [18], το οποίο εισάγει μέτρα που έχουν στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας της ναυτιλίας, ώστε να περιορισθεί η κατανάλωση καυσίμων και οι εκπομπές CO₂. Στον Κανονισμό 21 εισάγεται ο Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (Energy Efficiency Design Index – EEDI), ο οποίος αφορά κυρίως τεχνικά μέτρα και είναι υποχρεωτικός για νεότευκτα πλοία. Στον Κανονισμό 22 εισάγεται ένα υποχρεωτικό εργαλείο διαχείρισης (Ship Energy Efficiency Management Plan – SEEMP), το οποίο αφορά λειτουργικά κυρίως μέτρα, για όλα τα πλοία. Για να μπορέσει ένα πλοίο να αποκτήσει το Διεθνές Πιστοποιητικό Ενεργειακής Αποδοτικότητας (International Energy Efficiency Certificate – IEEC), θα πρέπει να τηρεί τις απαιτήσεις για τον EEDI και το SEEMP. Οι κανονισμοί ισχύουν για όλα τα πλοία άνω των 400 τόνων ολικής χωρητικότητας.

Τον Απρίλιο του 2018, η MEPC 72 ενέκρινε το ψήφισμα MEPC.304(72) σχετικά με την αρχική στρατηγική του IMO για την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από πλοία. Οι επιδιώξεις αυτής της στρατηγικής είναι οι εξής [20]:

1. Η μείωση των σχετικών εκπομπών μέσω της εφαρμογής περαιτέρω περιόδων του EEDI για νέα πλοία, μέσω αναθεώρησης των απαιτήσεων του EEDI, για κάθε τύπο πλοίου,
2. Η μείωση των σχετικών εκπομπών από την διεθνή ναυτιλία, ώστε να μειωθούν οι εκπομπές CO₂ ανά μεταφορικό έργο, κατά 40% έως το 2030 και κατά 70% έως το 2050, σε σύγκριση με το 2008,
3. Η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από την διεθνή ναυτιλία, ώστε να μειωθούν κατά 50% το λιγότερο έως το 2050 σε σύγκριση με το 2008, με σκοπό τον θερμοκρασιακό στόχο της Συμφωνίας του Παρισιού.

4.4.1. Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (EEDI)¹⁰

Ο Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας στοχεύει σε σταδιακά βελτίωση της υδροδυναμικής σχεδίασης γάστρας-έλικας για τις διάφορες κατηγορίες πλοίων και στην εγκατάσταση λιγότερο ενεργοβόρων κύριων μηχανών και βοηθητικών μηχανημάτων. Ο δείκτης για κάθε νέα σχεδίαση εκφράζει την παραγωγή CO₂ (σε γραμμάρια) ανά μονάδα μεταφορικής ικανότητας – απόστασης (σε τόνο – μίλια). Όσο μικρότερη η τιμή του, τόσο ενεργειακά αποδοτικότερο είναι το πλοίο [21]. Ένας γενικός τύπος είναι ο εξής (4.1):

$$EEDI = \frac{P \cdot SFOC \cdot C_F}{DWT \cdot Distance} \quad (4.1)$$

Όπου,

- P, η ισχύς που απαιτείται για την κίνηση του πλοίου σε [kW],
- SFOC, η ειδική κατανάλωση καυσίμου σε [g/kWh],
- C_F, αδιάστατος συντελεστής εκπομπής που βασίζεται στο περιεχόμενο του καυσίμου σε άνθρακα,
- DWT, μεταφορική ικανότητα του πλοίου σε [t],
- Distance, η απόσταση σε [nm].

Η αναλυτική μορφή δίνεται στο ψήφισμα MEPC.254(67).

Επίσης, ο Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης μπορεί να οριστεί ως ο λόγος του κόστους για το περιβάλλον προς την ωφέλεια για την κοινωνία που προκύπτει από τις μεταφορές από ένα πλοίο (4.2).

$$EEDI = \frac{\text{Κόστος για το περιβάλλον}}{\text{Όφελος για την κοινωνία}} = \frac{\text{Εκπομπές CO}_2}{\text{Μεταφορικό έργο}} \quad (4.2)$$

Για να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο μείωσης των εκπομπών, θεωρείται κάποια απαιτούμενη τιμή EEDI, η οποία σταδιακά μειώνεται. Για την επιτευχθείσα τιμή EEDI κάθε πλοίου θα πρέπει να ισχύει (4.3):

$$\text{Επιτευχθής EEDI} \leq \text{Απαιτούμενος EEDI} \quad (4.3)$$

Η μείωση του EEDI είναι 10% ανά 5 έτη, ξεκινώντας την 1^η Ιανουαρίου 2015. Επομένως, για πλοία που ναυπηγούνται από το 2025 και έπειτα, η μείωση θα φτάσει το 30% [22].

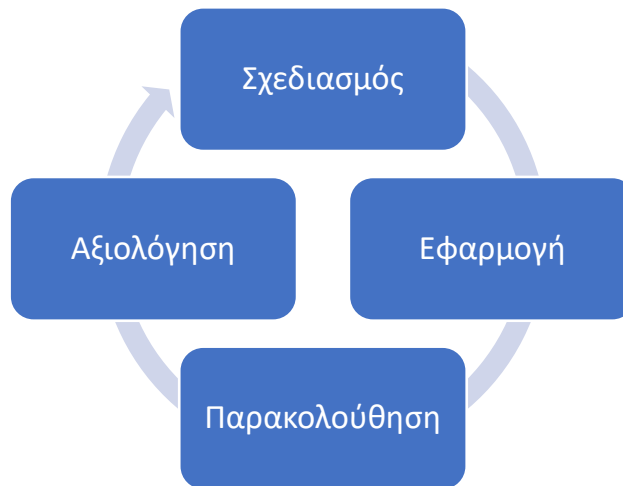
4.4.2. Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Αποδοτικότητας Πλοίου (SEEMP)¹¹

Το SEEMP είναι ένα λειτουργικό μέτρο, το οποίο καθιερώνει έναν μηχανισμό βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου με κοστολογικά αποδοτικό τρόπο. Η ανάπτυξη και εφαρμογή του SEEMP είναι μία συνεχής διαδικασία, που περιλαμβάνει τέσσερα κύρια στάδια:

- Σχεδιασμός,
- Εφαρμογή,
- Παρακολούθηση,
- Αυτοαξιολόγηση και βελτίωση.

¹⁰ Energy Efficiency Design Index

¹¹ Ship Energy Efficiency Management Plan



Εικόνα 4 Πλαίσιο του σχεδίου διαχείρισης ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίου (SEEMP)

Η παρακολούθηση της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου σημαίνει τη συνεχή συλλογή των κατάλληλων δεδομένων σε όλες τις φάσεις της λειτουργίας του πλοίου.

4.4.3. Δείκτης Λειτουργικής Ενεργειακής Αποδοτικότητας (ΕΕΟΙ)¹²

Ο Δείκτης Λειτουργικής Ενεργειακής Αποδοτικότητας αναπτύχθηκε προκειμένου να παρακολουθείται η ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου. Σε αντίθεση με τον EEDI, που χρησιμοποιεί τα σχεδιαστικά στοιχεία του πλοίου, ο ΕΕΟΙ χρησιμοποιεί τις πραγματικές εκπομπές CO₂. Στο ψήφισμα MEPC 63/23 προτείνεται στο στάδιο παρακολούθησης του SEEMP, η χρήση του ΕΕΟΙ. Ο ΕΕΟΙ δίνεται από τον ακόλουθο τύπο (4.4) [23]:

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j C_{Fj}}{m_{cargo} D} \quad (4.4)$$

Όπου,

- j, είναι ο τύπος καυσίμου,
- FC_j, είναι η μάζα του καυσίμου που καταναλώθηκε [tonnes],
- C_{Fj}, είναι ο αδιάστατος συντελεστής εκπομπής που αποδίδει τη μάζα CO₂ που εκπέμπεται,
- m_{cargo}, το φορτίο που μεταφέρθηκε [tonnes],
- D, η απόσταση που διανύθηκε [nm].

4.4.4. Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης Υπάρχοντος Πλοίου (ΕΕΧΙ)¹³

Ο συγκεκριμένος δείκτης αναπτύχθηκε προκειμένου να δείχνει για κάθε πλοίο την ενεργειακή του απόδοση σε σύγκριση με την γραμμή βάσης και εκφράζεται σε ποσοστό του υφιστάμενου δείκτη ΕΕΧΙ. Ο ΕΕΧΙ υπολογίζεται σύμφωνα με συγκεκριμένο τύπο και μετρείται σε [g/t*nm].[24]

¹² Energy Efficiency Operational Indicator

¹³ Energy Existing Ship Indicator

4.4.5. Ετήσιος Δείκτης Έντασης Λειτουργικού Άνθρακα (Annual Operational CII)

Ο Ετήσιος Δείκτης Έντασης Λειτουργικού Άνθρακα υπολογίζεται για πλοία άνω των 5000 GT και αποτελεί ένα μέτρο για το πόσο αποτελεσματικά μεταφέρονται τα φορτία ή οι επιβάτες σε σύγκριση με το διοξείδιο του άνθρακα που εκπέμπεται. Ο δείκτης προκύπτει από τον Ετήσιο Λόγο Απόδοσης, ο οποίος μετρά τις εκπομπές άνθρακα κατά τη λειτουργία ενός πλοίου σε διάρκεια ενός έτους. Ανάλογα με την προκύπτουσα τιμή, τα πλοία θα κατατάσσονται εντός των επιπέδων διαβάθμισης A, B, C, D και E. Ένα πλοίο με διαβάθμιση D για τρία συναπτά έτη ή E για ένα έτος, πρέπει να υποβάλλει σχέδιο διόρθωσης, προκειμένου να επιτευχθεί δείκτης C ή ανώτερος. Ο δείκτης υπολογίζεται σε γραμμάρια CO₂ ανά τόνο DWT – ναυτικό μίλι.

4.5. Παρακολούθηση Αέριων Εκπομπών

Ως απόρροια της προσπάθειας μείωσης των εκπομπών και επιβολής κανονισμών έρχεται η ανάγκη για έλεγχο/παρακολούθηση της δραστηριότητας των πλοίων, ώστε να καταγράφονται οι εκπομπές τους. Για τον σκοπό αυτό τόσο η Ευρωπαϊκή Ένωση, όσο και ο IMO, έχουν προχωρήσει στην δημιουργία συστήματος παρακολούθησης των εκπομπών. Η Ευρωπαϊκή Ένωση, με τον Κανονισμό 2015/757 για την παρακολούθηση, υποβολή εκθέσεων και επαλήθευσής των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από θαλάσσιες μεταφορές (Monitoring, Reporting and Verification of CO₂ emissions – MRV). Καθώς και ο IMO, με την υιοθέτηση το 2016 του συστήματος συλλογής δεδομένων για την κατανάλωση καυσίμων (Data Collection System on fuel consumption – DCS). Παρακάτω, αναλύονται αυτά τα δύο συστήματα.

4.5.1. EU MRV

Ο Κανονισμός 2015/757 ορίζει κανόνες για την παρακολούθηση, υποβολή εκθέσεων και επαλήθευση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και άλλων συναφών πληροφοριών από τα πλοία που καταπλέουν σε λιμένες, βρίσκονται εντός λιμένων ή αποπλέουν από λιμένες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ο Κανονισμός εφαρμόζεται σε πλοία ολικής χωρητικότητας άνω των 5000 τόνων, όσων αφορά τις εκπομπές που παράγονται κατά τη διάρκεια των πλόων τους από και προς λιμένες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και όσο βρίσκονται σε λιμένα της. Η πρώτη περίοδος καταγραφής ήταν 1 Ιανουαρίου έως 31 Δεκεμβρίου 2018.

Η διαδικασία εφαρμογής του MRV, ακολουθεί τα έξι βήματα που ακολουθούν [25]:

1. Οι πλοιοκτήτριες εταιρείες υποβάλλουν για κάθε πλοίο τους Σχέδιο Παρακολούθησης, όπου αναφέρεται η επιλεχθείσα μέθοδος παρακολούθησης και οι ελεγκτές το αξιολογούν.
2. Οι εταιρείες παρακολουθούν τις εκπομπές CO₂ για κάθε πλοίο ανά πλου και ανά έτος.
3. Οι εταιρείες υποβάλλουν την έκθεση εκπομπών CO₂.
4. Οι ελεγκτές επαληθεύουν τις εκθέσεις εκπομπών και εκδίδουν έκθεση επαλήθευσης.
5. Οι ελεγκτές εκδίδουν έγγραφο συμμόρφωσης.
6. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δημοσιεύει την ετήσια έκθεση σχετικά με τις εκπομπές CO₂.

Με σκοπό τη διευκόλυνση της διαδικασίας καταγραφής των εκπομπών, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή και ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός για την Ασφάλεια στη Θάλασσα (EMSA), δημιούργησαν το σύστημα πληροφοριών THETIS MRV. Το THETIS-MRV μειώνει το διοικητικό φόρτο, διευκολύνοντας την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ εταιρειών, ελεγκτών, της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και Σημειών Κρατών. Οι πληροφορίες του συστήματος είναι διαθέσιμες στο κοινό.

Η έκθεση για το 2019 εκδόθηκε τον Μάιο του 2020, δείχνοντας ότι στο σύστημα συμμετείχαν περισσότερα από 11600 πλοία και ότι οι περισσότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα CO₂ προέρχονται από ταξίδια εκτός του Ευρωπαϊκού Οικονομικού Χώρου.

4.5.2. IMO DCS

Όμοια με το EU-MRV, έτσι και το IMO DCS, συλλέγει στοιχεία με στόχο συμβολή στη μείωση των εκπομπών CO₂. Σύμφωνα με τη MEPC 70 είναι υποχρεωτική η συλλογή δεδομένων κατανάλωσης καυσίμου για όλα τα πλοία ολικής χωρητικότητας 5000 τόνων και άνω, σε παγκόσμια κλίμακα και η υποβολή τους στην αρμόδια Σημαία Κράτους. Το σχέδιο παρακολούθησης είναι μέρος του SEEMP [26]. Η πρώτη περίοδος καταγραφής ήταν 1 Ιανουαρίου έως 31 Δεκεμβρίου 2019.

Οι βασικές διαφορές με το EU-MRV είναι ότι γίνεται καταγραφή της κατανάλωσης καυσίμου και όχι των εκπομπών CO₂, καθώς και ότι τα αποτελέσματα δεν δημοσιεύονται.

5. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Ερευνών Υπολογισμού Αέριων Εκπομπών

5.1. Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση μελετών για τον υπολογισμό των εκλυόμενων ρύπων από πλοία τόσο σε παγκόσμια κλίμακα, όσο και σε επίπεδο λιμένων.

5.2. Μέθοδοι Υπολογισμού Αέριων Εκπομπών

Σε αυτή την ενότητα, περιγράφονται οι δύο βασικές μέθοδοι που μπορούν να ακολουθηθούν για τον υπολογισμό των αέριων εκπομπών από την ναυτιλία, αυτές είναι η μέθοδος με βάση την δραστηριότητα των πλοίων (“bottom-up”) και η μέθοδος με βάση το χρησιμοποιούμενο καύσιμο από τα πλοία (“top-down”), ενώ στη βιβλιογραφία έχουν χρησιμοποιηθεί και ενδιάμεσες προσεγγίσεις. Στη συνέχεια, αναλύονται αυτές οι δύο μέθοδοι [27].

5.2.1. Μέθοδος «μικροκλίμακας» - Προσέγγιση “Bottom-up”

Σε αυτήν την περίπτωση, όπως φαίνεται και από τον όρο “bottom-up”, γίνεται ο υπολογισμός από κάτω προς τα πάνω δηλαδή, με βάση τη δραστηριότητα κάθε πλοίου υπολογίζονται οι εκπομπές του και στη συνέχεια αθροίζονται, ώστε να υπολογιστούν οι συνολικές εκπομπές, π.χ. ενός στόλου ή σε μία γεωγραφική περιοχή. Η μέθοδος αυτή είναι πιο ακριβής και λεπτομερής, αφού βασίζεται στα χαρακτηριστικά του κάθε πλοίου και στη κίνηση του. Όμως, σε αυτό το σημείο έγκειται και το μειονέκτημα της, δηλαδή χρειάζονται πολλά και εξειδικευμένα στοιχεία για κάθε πλοίο, που η διαδικασία συλλογής τους καθιστά πιθανώς την διαδικασία πολύπλοκη και χρονοβόρα. Επίσης, στην περίπτωση αρκετές παραδοχές λόγω έλλειψης των απαιτούμενων στοιχείων, υπεισέρχεται αβεβαιότητα στους υπολογισμούς.

5.2.2. Μέθοδος «μακροκλίμακας» - Προσέγγιση “Top-down”

Η μέθοδος υπολογισμού “top-down” βασίζεται στις αναφερόμενες ποσότητες ή πωλήσεις ναυτιλιακών καυσίμων από τις οποίες γίνεται η εκτίμηση του συνόλου των εκπεμπόμενων ρύπων. Η μέθοδος αυτή απαιτεί λιγότερα στοιχεία από ότι η προηγούμενη, αλλά υπάρχει αβεβαιότητα ως αναφορά την πηγή των εκπομπών με αποτέλεσμα να υπάρχει δυσκολία στο να γίνει κάποια συγκριτική ανάλυση, για παράδειγμά μεταξύ των εγχώριων και παγκόσμιων εκπομπών.

5.3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

5.3.1. Έρευνες Μεγάλης Κλίμακας

Οι Jalkanen et al. [28], έχουν ασχοληθεί εκτενώς με τις εκπομπές καυσαερίων από τα πλοία. Έχουν αναπτύξει ένα μοντέλο υπολογισμού των εκπομπών ρύπων από τις θαλάσσιες μεταφορές στη Βαλτική Θάλασσα, το STEAM (Ship Traffic Emission Assessment Model), το οποίο έχουν εξελίξει με την πάροδο των χρόνων STEAM2, STEAM3. Το μοντέλο χρησιμοποιεί στοιχεία όπως, δεδομένα AIS, σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του πλοίου, στιγμιαίες ταχύτητες και δεδομένα όπως ειδική κατανάλωση καυσίμου, ισχύς κύριας μηχανής. Η βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε είναι η Lloyds Register of Shipping, με συμπληρωματικά στοιχεία από τις τοπικές αρχές, τους πλοιοκτήτες και τους κατασκευαστές μηχανών. Σε περίπτωση, που κάποιο πλοίο δεν υπήρχε στη βάση ή δεν μπορούσαν να εξαχθούν κάποια στοιχεία, έγιναν κάποιες παραδοχές. Σχετικά με τους συντελεστές εκπομπών, για τα οξείδια του αζώτου (NO_x), ελήφθησαν σύμφωνα με ρυθμό περιστροφής του κινητήρα, ενώ τα οξείδια του θείου (SO_x) και το διοξείδιο του θείου (CO_2) εξαρτώνται από την ειδική κατανάλωση καυσίμου. Επίσης, εξετάστηκε η επίδραση των τεχνικών μείωσης εκπομπών, όπως πλυντρίδες (scrubbers), ανακυκλοφορία καυσαερίων (Exhaust Gas Recirculation – EGR), σύστημα επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής (Selective Catalytic Reduction – SCR) και τροποποιήσεις στη μηχανή. Ωστόσο, οι τεχνικές πληροφορίες για τέτοιες πληροφορίες, όπως επίσης για βοηθητικές μηχανές, ήταν ελάχιστες, και για την ανάκτηση τους θα έπρεπε να απευθυνθούν στους πλοιοκτήτες. Η στιγμιαία ταχύτητα υπολογίστηκε ως συνάρτηση της ταχύτητας του πλοίου, εξαρτώμενη από συντελεστές αντίστασης και την βρεχόμενη επιφάνεια του πλοίου. Οι συντελεστές δεν υπολογίστηκαν αλλά αντιπροσωπεύονται από ένα παράγοντα k . Η επίδραση των κυμάτων λήφθηκε υπόψη. Οι υπολογισθείσες τιμές των αέριων εκπομπών έξι πλοίων RoPax συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα μεγέθη που είχαν δηλωθεί. Αν και η παραπάνω εργασία, ήταν πρωτοποριακή, στη μεθοδολογία της έγιναν κάποιες εμφανείς παραδοχές, όπως για την ειδική κατανάλωση καυσίμου, που χρησιμοποιήθηκε μία τιμή σε όλες τις περιπτώσεις.

Σχετικά με τη μελέτη της Entec [29], προέκυψαν συντελεστές εκπομπών για τα οξείδια του αζώτου (NO_x), τα οξείδια του θείου (SO_x), το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), υδρογονάνθρακες (HC) και σωματίδια (PM) για πέντε διαφορετικούς τύπους κινητήρων και τρία διαφορετικά είδη καυσίμου. Η περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο βασίστηκε σε δεδομένα από τον IMO, όπου δηλαδή χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές τιμές για βαρύ πετρέλαιο και ντίζελ πλοίων (Residual Oil (RO) – 2.7%, Marine Diesel Oil (MDO) – 1.0%, Marine Gas Oil (MGO) – 0.5%). Επιπλέον, οι συντελεστές εκπομπών και η ειδική κατανάλωση καυσίμου υπολογίστηκε για κάθε συνδυασμό κινητήρα – καυσίμου σε τρεις διαφορετικές φάσεις λειτουργίας των πλοίων, στην θάλασσα (πλεύση – cruising), στο λιμάνι (ελλιμενισμός, για φόρτωση, εκφόρτωση ή διανυκτέρευση – loading, unloading, hoteling), φάση ελιγμών (maneuvering). Στην περίπτωση που το πλοίο χρησιμοποιούσε δύο τύπους καυσίμου, στην ανάλυση επιλεγόταν το πιο ρυπογόνο. Τέλος, γίνεται αναφορά στον συντελεστή φόρτωσης (Load Factor) για κύριες και βοηθητικές μηχανές. Αυτή η μελέτη αποτελεί μία πολύ καλή βάση για τους συντελεστές εκπομπών.

Ο Οργανισμός Προστασίας Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (United States Environment Protection Agency – USEPA) παρουσίασε το 2009 [30] μεθοδολογίες για την εκτίμηση των εκπομπών καυσαερίων από τα πλοία κοντά στις ακτές των ΗΠΑ. Σε αυτήν την έρευνα συμπεριλήφθηκε στις φάσεις λειτουργίας των πλοίων, η έννοια των ζωνών μειωμένης ταχύτητας (Reduced Speed Zones – RSZ). Αυτές οι ζώνες περιέχουν ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων που

καθορίζεται κυρίως από την περιοχή – λιμάνι σε κάθε περίπτωση. Αποτελεί μία ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ της πλεύσης και των ελιγμών. Ο συντελεστής φόρτωσης σε κατάσταση πλεύσης θεωρήθηκε 83% και σε χαμηλότερες ταχύτητες υπολογίσθηκε σύμφωνα με τον νόμο της έλικας, την κυβική σχέση που συσχετίζει την πραγματική ταχύτητα και την μέγιστη ταχύτητα. Επίσης, διαφορετικοί συντελεστές φόρτωσης χρησιμοποιήθηκαν για τις βοηθητικές μηχανές. Οι συντελεστές εκπομπών αντλήθηκαν από την Entec [29]. Τέλος, προτείνονται κάποιες τροποποιήσεις, ώστε η αβεβαιότητα στις εκτιμώμενες τιμές να μειωθεί.

Σε ανάλογη έρευνα ο Trozzi [31] αναλύοντας δεδομένα για περίπου 100000 πλοία από τη βάση δεδομένων Lloyd's Register of Shipping, υπολόγισε τους εκπεμπόμενους ρύπους είτε με βάση την κατανάλωση καυσίμου, είτε την εγκατεστημένη ισχύ, τόσο για την κύρια μηχανή όσο και για τις βοηθητικές. Για δεδομένη κατανάλωση καυσίμου, οι εκπομπές υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας τους συντελεστές εκπομπών από την Entec [29]. Στην αντίθετη περίπτωση, οι εκπομπές υπολογίστηκαν ως συνάρτηση του συντελεστή φόρτωσης, της εγκατεστημένης ισχύς καθώς και τον χρόνο κάθε διαφορετικής φάσης λειτουργίας. Σε αυτή την μελέτη δεν χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το σύστημα AIS, αλλά δεδομένα λιμένων και δρομολογίων. Σε περίπτωση που κάποια δεδομένα δεν ήταν διαθέσιμα, επιλεγόταν βάση στατιστικών μελετών. Στο τέλος, προτείνεται μία απλουστευμένη μεθοδολογία, σε περίπτωση που αρκετά δεδομένα δεν είναι διαθέσιμα, όπου ο υπολογισμός γίνεται συναρτήσει των συντελεστών εκπομπών από τη βιβλιογραφία, με στατιστικά δεδομένα για τη δραστηριότητα των πλοίων και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους. Σε αυτή την μελέτη δεν παρουσιάζονται εκτιμώμενες τιμές των ρύπων.

Η 4^η Μελέτη του IMO για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου [3] εκτίμησε τις εκπομπές από τα πλοία για το διάστημα 2012-2018. Αυτή είναι η πρώτη Μελέτη του IMO, που γίνεται διάκριση μεταξύ των εκπομπών της εγχώριας και διεθνούς ναυτιλίας, ακολουθώντας μία μέθοδο που είναι σύμφωνη με τις οδηγίες της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος (International Panel on Climate Change – IPCC). Για την μέθοδο αυτή, χρησιμοποιούνται στοιχεία από το σύστημα AIS. Οι υπολογισμοί έγιναν με δύο μεθόδους, την μέθοδο top-down, όπου υπολογίζονται οι συνολικές εκπομπές με βάση τις πωλήσεις καυσίμων και στη συνέχεια αποδίδονται σε κάθε πλοίο, και την μέθοδο bottom-up, όπου υπολογίζονται οι αέριες εκπομπές κάθε πλοίου από τα δεδομένα του AIS και αθροιστικά προκύπτουν οι συνολικές. Οι Περιοχές Ελεγχόμενων Ρύπων (ECA) ελήφθησαν υπόψη. Οι φάσεις λειτουργίας υπολογίστηκαν ανάλογα με την ταχύτητα, το φορτίο της μηχανής αλλά και την απόσταση από το λιμάνι/ακτή. Για τη λειτουργία των γεννητριών, ως βάση λειτούργησε η 3^η Μελέτη του IMO αλλά συμπεριλήφθηκαν στοιχεία και από άλλες μελέτες και επιπρόσθετα δεδομένα. Επίσης, ο συντελεστής επίδρασης καιρού και ο συντελεστής επίδρασης ρύπανσης της γάστρας ελήφθησαν υπόψη. Οι συγκεκριμένες μελέτες του IMO, αποτελούν παγκόσμια αναφορά για τις εκπομπές των πλοίων στον πλανήτη και παρουσιάζουν μία πολύ λεπτομερή μεθοδολογία. Βέβαια, είναι φανερό ότι οι βάσεις δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αρκετά μεγάλες, όπως και γενικά η πρόσβαση σε δεδομένα.

5.3.2. Έρευνες σε Επίπεδο Λιμένων

Μία μελέτη που αφορούσε το λιμάνι του Πειραιά, είναι αυτή του Τζαννάτου [32], η ανάλυση έγινε σε επιβατηγά πλοία για την χρονική περίοδο Ιούνιος 2008 – Μάιος 2009. Οι τύποι πλοίων ήταν επιβατηγά (Pax), επιβατηγά-οχηματαγωγά (RoPax) και κρουαζιερόπλοια. Τα δεδομένα για την δραστηριότητα των πλοίων αντλήθηκαν από το Ελληνικό Υπουργείο Εμπορικής Ναυτιλίας και το Λιμεναρχείο Πειραιά, ενώ τεχνικά χαρακτηριστικά από την Lloyd's Register of Shipping. Η ανάλυση

εξέτασε μόνο τις φάσεις λειτουργίας ελιγμών και ελλιμενισμού. Ο χρόνος αγκυροβόλησης θεωρήθηκε 8 ώρες για κάθε πλοίο. Ο χρόνος ελιγμών υπολογίστηκε ως το πηλίκο της απόστασης από το σημείο που αγκυροβόλησε το πλοίο έως την είσοδο/έξοδο του λιμένα (υποθέτοντας 5 κόμβους ταχύτητα κατά την είσοδο και 8 κόμβους κατά την έξοδο από τον λιμένα), αθροίζοντας σε αυτή την τιμή ένα μέσο όρο 9 λεπτών, από τα οποία 6 για την πρόσδεση και 3 για τον απόπλου του πλοίου. Οι συντελεστές φόρτωσης ελήφθησαν από έρευνες στα πλοία που καλούσαν τον λιμένα. Επίσης, εξετάστηκαν οι οικονομικές επιπτώσεις των εκτιμώμενων ρύπων, σύμφωνα με τις εκθέσεις της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Αυτή η έρευνα είναι χρήσιμη για τις ντιζελο-ηλεκτρογεννήτριες. Έγινε, η υπόθεση ότι το 27.8% της παραγόμενης ισχύς προώσεως προσδίδεται από τις βοηθητικές μηχανές. Τα συμπεράσματα αυτής της μελέτης ήταν ότι σε ένα λιμάνι-πόλη, όπως ο Πειραιάς, τα μέτρα για τους εκπεμπόμενους ρύπους θα πρέπει να ήταν αυστηρότερα από τα ισχύοντα, καθώς, επίσης, ότι για την βελτίωση των εκτιμώμενων τιμών θα πρέπει να αναθεωρηθούν τιμές όπως, οι συντελεστές εκπομπών.

Οι Ng et al. [33] μελέτησαν την περιοχή του λιμένα του Hong Kong χρησιμοποιώντας δεδομένα από το σύστημα AIS για να εκτιμήσουν τα φορτία της κύριας μηχανής. Με αυτά τα δεδομένα και στοιχεία για τις βοηθητικές μηχανές από τις αναφορές του λιμένα του Los Angeles, αναπαρήγαγαν μία χωρική κατανομή των εκπομπών.

Οι Chen et al. [34] προέβησαν σε μία λεπτομερή απογραφή των εκπομπών καυσαερίων από τα πλοία χρησιμοποιώντας δεδομένα από τον σύστημα AIS για το λιμάνι Tianjin στην Κίνα, που είναι το μεγαλύτερο λιμάνι της Βόρειας Κίνας. Μελετήθηκαν οι εκπομπές οξειδίων του θείου (SO_x), οξειδίων του αζώτου (NO_x), σωματιδίων (PM), μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Τα δεδομένα της δραστηριότητας των πλοίων, καθώς και πληροφορίες για τον τύπο πλοίου, το μέγεθος και άλλες τεχνικές πληροφορίες ελήφθησαν από τον Κινέζικο Νηογνώμονα (China Classification Society – CCS) και τη βάση δεδομένων Lloyd's Register Shipping. Με σκοπό η βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε στην έρευνα να έχει έγκυρα στοιχεία, έγιναν τέσσερις έλεγχοι σχετικά με: 1) την θέση των πλοίων, 2) διπλές ή ατελής εγγραφές, 3) τους μη έγκυρους Αριθμούς Διακριτικού Σταθμού Πλοίου (Maritime Mobile Service Identity number – MMSI), 4) μη ρεαλιστικές ταχύτητες πλοίου. Επίσης, ανάλογα με την ταχύτητα του πλοίου, καθορίστηκαν και οι φάσεις λειτουργίας του πλοίου. Συγκεκριμένα, για ταχύτητα μικρότερη του 1 κόμβου το πλοίο θεωρούταν ελλιμενισμένο, για ταχύτητα μεταξύ στο διάστημα 1-8 κόμβους σε κατάσταση ελιγμών και για ταχύτητα μεγαλύτερη των 8 κόμβων σε κατάσταση πλεύσης. Ο συντελεστής φόρτωσης υπολογίστηκε σύμφωνα με τον νόμο της έλικας, την κυβική σχέση που συσχετίζει την πραγματική ταχύτητα και την μέγιστη ταχύτητα. Σε αυτήν την έρευνα έγιναν αρκετές παραδοχές, που συντέλεσαν στην όξυνση της αναμενόμενης αβεβαιότητας.

Για τις μελέτες που γίνονται στην περιοχή των λιμένων, σημαντικό ρόλο έχουν και οι λιμενικές αρχές, όπου σε κάποιες περιπτώσεις δημοσιεύουν περιβαλλοντικές εκθέσεις. Παράδειγμα αποτελεί το λιμάνι του Los Angeles, το οποίο από το 2005 δημοσιεύει τέτοιες μελέτες, οι οποίες αναφέρονται στις δραστηριότητες είτε στη στεριά είτε στη θάλασσα που παράγουν εκπομπές στο περιβάλλον. Οι εκπομπές που αναλύονται είναι τα οξείδια του αζώτου (NO_x), τα οξείδια του θείου (SO_x), το ισοδύναμο του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2e), υδρογονάνθρακες (HC) και σωματίδια (PM).

6. Αναλυτικές Μεθοδολογίες Υπολογισμού Αέριων Εκπομπών

6.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των μεθοδολογιών για την εκτίμηση των εκπεμπόμενων ρύπων που χρησιμοποιούνται στο εγχειρίδιο “EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019” [35], καθώς και στην 4^η Έκθεση του IMO, από την οποία αντλούνται τα περισσότερα μεθοδολογικά στοιχεία και δεδομένα. Ουσιαστικά, η «Προσέγγιση Επιπέδου 3» και η μέθοδος του IMO είναι αυτές που χρησιμοποιούνται στο υπολογιστικό εργαλείο.

6.2. Εγχειρίδιο EMEP/EEA 2019

Το εγχειρίδιο αποτελεί έναν ολοκληρωμένο τεχνικό οδηγό για την απογραφή εκπεμπόμενων ρύπων από το σύνολο των πιθανών πηγών κάθε χώρας και παρουσιάζεται στη συνέχεια, έχει εκδοθεί από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (European Environment Agency – EEA), με στόχο να διασφαλίσει ότι στοιχεία που κατατίθενται από ευρωπαϊκές χώρες για την ποιότητα του αέρα είναι συνεπή και συγκρίσιμα, δεδομένου ότι έχουν μία κοινή μεθοδολογική βάση. Η έκδοση του 2019 αποτελεί την πιο πρόσφατη έκδοση του εγχειριδίου, ενώ η πρώτη έκδοση του εκδόθηκε το 1996 στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος Corinair [36].

Στο εγχειρίδιο συμπεριλαμβάνονται τρεις βασικές μεθοδολογίες υπολογισμού για τους συνολικούς ρύπους που εκπέμπονται από τη ναυτιλία. Οι πρώτες δύο προσεγγίσεις (Tier 1 και Tier 2) είναι πιο γενικές μεθοδολογίες μακροκλίμακας, “top-down”, χρησιμοποιώντας στατιστικά στοιχεία, όπως πωλήσεις καυσίμων και συνολικές αφίξεις σε λιμάνια, ενώ η τρίτη (Tier 3) είναι πιο λεπτομερής, μέθοδος μικροκλίμακας, “bottom-up”, και υπολογίζει αναλυτικά τις εκπομπές ξεχωριστά για όλες τις φάσεις ενός ταξιδιού χρησιμοποιώντας δεδομένα δραστηριότητας για κάθε πλοίο, καθώς και τεχνικές πληροφορίες. Παρακάτω, παρουσιάζονται αυτές οι τρεις προσεγγίσεις.

Προσέγγιση Επιπέδου 1 (Tier 1)

Στην πρώτη προσέγγιση (Tier 1), ο υπολογισμός των εκπεμπόμενων ρύπων για το σύνολο των ναυτιλιακών δραστηριοτήτων μίας χώρας υπολογίζεται με βάση την ποσότητα και το είδος των καυσίμων που καταναλώνονται. Έτσι, η μέθοδος αυτή προϋποθέτει να υπάρχουν στατιστικά στοιχεία για τις συνολικές πωλήσεις ναυτιλιακών καυσίμων σε μία χώρα. Οι εκτιμήσεις πραγματοποιούνται με χρήση κατάλληλων συντελεστών εκπομπών ρύπων σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση (6.1).

$$E_i = \sum_m (FC_m \cdot EF_{i,m}) \quad (6.1)$$

Όπου,

- E_i : Εκπομπές του ρύπου i
- FC_m : Συνολική ποσότητα καυσίμου είδους m που καταναλώθηκε [*tonnes*]
- $EF_{i,m}$: Συντελεστής εκπομπής ρύπου i από κατανάλωση καυσίμου είδους m [*kg/tonne fuel*]

- m : Είδος καυσίμου

Σχετικά με τα χρησιμοποιούμενα από τη ναυτιλία καύσιμα, αυτά συνηθιζόταν να είναι βαριά υπολείμματα της διύλισης του αργού πετρελαίου για την κύρια μηχανή (Bunker Fuel Oil – BFO), καθώς και ελαφρύτερα αποστάγματα (Marine Diesel Oil – MDO, Marine Gas Oil – MGO) για τις βοηθητικές μηχανές. Για αυτές τις δύο κατηγορίες καυσίμων παρέχονται από το εγχειρίδιο τιμές για τους συντελεστές ρύπων. Όμως, αρχικά στις Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών (ECA), αλλά από το 2020 σε παγκόσμιο επίπεδο, τα πλοία είναι υποχρεωμένα να χρησιμοποιούν καύσιμα με περιεκτικότητα θείου είτε 0.1% ή 0.5%. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με χρήση καυσίμων με χαμηλού θείου (Low Sulphur Heavy Fuel Oil - LSHFO), με χρήση Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (LNG), σε όποια πλοία διαθέτουν ανάλογη κύρια μηχανή, και με τεχνολογίες μείωσης ρύπων, όπως εγκατάσταση scrubbers.

Η πρώτη προσέγγιση, όπως φαίνεται δεν λαμβάνει υπόψη πληροφορίες σχετικά με την κύρια μηχανή, όπως η κατάσταση λειτουργίας ή ο τύπος της. Έτσι, γίνεται αντιληπτό ότι αυτή η ανάλυση παρέχει μία πρώτη προσέγγιση για τον όγκο των παραγόμενων ρύπων.

Προσέγγιση Επιπέδου 2 (Tier 2)

Η δεύτερη προσέγγιση συμπεριλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τον τύπο του κινητήρα και το είδος του καυσίμου που καταναλώνεται. Η εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των ρύπων είναι η ακόλουθη (6.2):

$$E_i = \sum_m [\sum_j (FC_{m,j} \cdot EF_{i,m,j})] \quad (6.2)$$

Όπου,

- E_i : Εκπομπές του ρύπου i
- $FC_{m,j}$: Συνολική ποσότητα καυσίμου είδους m που καταναλώθηκε [tonnes]
- $EF_{i,m,j}$: Συντελεστές εκπομπής ρύπου i από κατανάλωση καυσίμου είδους m [kg/tonne fuel]
- j : Τύπος κινητήρα (slow-, medium-, and high-speed diesel, gas turbine, and steam turbine)
- m : Είδος καυσίμου

Για κάθε συνδυασμό τύπου κινητήρα, καυσίμου (BDO, MDO – MGO) δίνονται οι συντελεστές εκπομπών. Η παραπάνω διαδικασία προϋποθέτει πως υπάρχουν στοιχεία για τις πωλήσεις ναυτιλιακών καυσίμων ξεχωριστά για κάθε τύπο κινητήρα και είδος καυσίμου. Επειδή τέτοιου είδους δεδομένα είναι δύσκολο να ανακτηθούν, στο εγχειρίδιο περιγράφεται βήμα-βήμα η διαδικασία για τη παραγωγή τέτοιου είδους πληροφορίας.

Αυτή, η δεύτερη, προσέγγιση είναι πιο λεπτομερής από την πρώτη, αφού λαμβάνει υπόψη περισσότερες τεχνικές πληροφορίες που επηρεάζουν την παραγωγή ρύπων. Παρ' όλα αυτά, και οι δύο προσεγγίσεις (Tier 1 και Tier 2) βασίζονται στις εθνικές πωλήσεις καυσίμων, και έτσι δεν υπολογίζουν, για παράδειγμα, εκπομπές από ποντοπόρα πλοία που έχουν ανεφοδιαστεί με καύσιμα σε χώρες εξωτερικού και επισκέπτονται λιμάνια της υπό μελέτη χώρας.

Προσέγγιση Επιπέδου 3 (Tier 3)

Αυτή η προσέγγιση, σε αντίθεση με τις δύο προηγούμενες που βασίζονται σε πωλήσεις καυσίμων, πραγματοποιεί τις εκτιμήσεις των παραγόμενων ρύπων για κάθε πλοίο ξεχωριστά με έμφαση σε

όλες τις φάσεις ενός ταξιδιού. Πιο συγκεκριμένα, η μεθοδολογία περιλαμβάνει διαφορετικούς συντελεστές για κάθε φάση («εν πλω», ελλιμενισμός, ελιγμοί) και γι' αυτό απαιτεί να υπάρχουν αναλυτικές πληροφορίες για την δραστηριότητα των πλοίων (χρόνοι ταξιδιού, ελιγμών, και ελλιμενισμού), καθώς και τεχνικές λεπτομέρειες για τον εξοπλισμό τους (τύπος κύριας μηχανής, ισχύς, είδος καυσίμου, κ.α.). Η διαδικασία είναι πιο χρονοβόρα σε σχέση με τις δύο προηγούμενες, αφού απαιτείται η εύρεση και διαχείριση ενός μεγάλου όγκου δεδομένων.

Οι συνολικές εκπομπές κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού προκύπτουν από το άθροισμα των επιμέρους φάσεων αυτού. Έτσι, για το σύνολο ενός ταξιδιού ισχύει (5.3):

$$E_{Trip} = E_{Hotteling} + E_{Maneuvering} + E_{Cruising} \quad (6.3)$$

Αν είναι γνωστή η κατανάλωση καυσίμου για κάθε φάση του ταξιδιού, τότε ο υπολογισμός των ρύπων γίνεται με παρόμοιο τρόπο με τις προηγούμενες προσεγγίσεις σύμφωνα με την εξίσωση (6.4):

$$E_{Trip,i,j,m} = \sum_p (FC_{j,m,p} \cdot EF_{i,j,m,p}) \quad (6.4)$$

Όπου,

- E_{Trip} : Συνολικές εκπομπές ενός ταξιδιού
- $FC_{i,j,m,p}$: Συντελεστές εκπομπής του ρύπου i από κατανάλωση καυσίμου είδους m [$kg/tonne\ fuel$]
- j : Τύπος κινητήρα (slow-, medium-, and high-speed diesel, gas turbine, and steam turbine)
- m : Είδος καυσίμου (BFO, MGO, MDO)
- i : Είδος ρύπου (NO_x , $NMVO$ C, PM)
- p : Φάση του ταξιδιού (εν πλω, ελλιμενισμός, ελιγμοί)

Η διαφορά βρίσκεται στο γεγονός πως παρέχονται ειδικοί συντελεστές εκπομπών για την κύρια μηχανή ανάλογα με τη φάση του ταξιδιού που μελετάται, ενώ υπάρχουν και ξεχωριστοί συντελεστές για τις εκπομπές ρύπων από τις βοηθητικές μηχανές. Αυτή η διαδικασία αφορά μόνο τους ρύπους NO_x , $NMVO$ C, PM . Οι υπόλοιποι ρύποι υπολογίζονται σύμφωνα με την προσέγγιση Tier 1.

Όταν δεν είναι γνωστές οι καταναλώσεις καυσίμων των εκάστοτε πλοίων, τότε οι εκτιμήσεις γίνονται μέσω των χρόνων που δαπανήθηκαν σε κάθε φάση του ταξιδιού. Οι ρύποι που εκπέμπονται υπολογίζονται με βάση τις κιλοβατώρες [kWh] που καταναλώνονται. Επομένως, στην εξίσωση υπολογισμού λαμβάνονται υπόψη στοιχεία που έχουν άμεση σχέση με το ποσό της ενέργειας που καταναλώνεται, όπως η ισχύς και το ποσοστό φόρτισης των μηχανών. Οι συντελεστές σε αυτή την περίπτωση είναι δια τις κιλοβατώρες που δαπανώνται κατά τη διάρκεια λειτουργίας των μηχανών. Η εξίσωση υπολογισμού είναι η ακόλουθη (6.5):

$$E_{Trip,i,j,m} = \sum_p \{ T_p \cdot [\sum_e (P_e \cdot LF_e \cdot EF_{e,i,j,m,p})] \} \quad (6.5)$$

Όπου,

- E_{Trip} : Συνολικές εκπομπές ενός ολοκληρωμένου ταξιδιού [$tonnes$]
- T_p : Χρόνος που διήρκεσε η κάθε φάση [$hours$]
- P_e : Μέγιστη συνεχής ισχύς μηχανής [kW]
- LF_e : Συντελεστής φόρτισης μηχανών [%]
- $EF_{e,i,j,m,p}$: Συντελεστές εκπομπής ρύπων [g/kWh]
- i : είδος ρύπου (NO_x , $NMVO$ C, PM)

- j : Τύπος κινητήρα (slow-, medium-, and high-speed diesel, gas turbine, and steam turbine)
- m : Είδος καυσίμου (BFO, MGO, MDO)
- p : Φάση του ταξιδιού (εν πλω, ελλιμενισμός, ελιγμοί)
- e : Κατηγορία μηχανής (κύρια, βοηθητική)

Για τον υπολογισμό των εκπομπών πρέπει να είναι γνωστή η ισχύς των μηχανών του υπό μελέτη πλοίου. Όταν δεν είναι διαθέσιμες αυτές οι πληροφορίες, τότε γίνεται προσέγγιση βάση της συνολικής χωρητικότητας (GT) του πλοίου σύμφωνα με τον Πίνακα 5.

Πίνακας 5 Εγκατεστημένη ισχύς ως συνάρτηση της χωρητικότητας GT

Κατηγορία Πλοίου	World fleet (2010)	Mediterranean Sea fleet (2006)
Liquid bulk ships	14.755*GT ^{0.6082}	14.602*GT ^{0.6278}
Dry bulk carriers	35.912*GT ^{0.5267}	47.115*GT ^{0.504}
Container	2.9165*GT ^{0.8719}	1.0839*GT ^{0.9617}
General cargo	5.56482*GT ^{0.7425}	1.2763*GT ^{0.9154}
Ro-Ro cargo	164.578*GT ^{0.4350}	45.7*GT ^{0.5237}
Passenger	9.55078*GT ^{0.7570}	42.966*GT ^{0.6035}
Fishing	9.75891*GT ^{0.7527}	24.222*GT ^{0.5916}
Other	59.049*GT ^{0.5485}	183.18*GT ^{0.4028}
Tugs	54.2171*GT ^{0.6420}	

Επίσης, η ισχύς των βοηθητικών μηχανών υπολογίζεται ως κλάσμα της εγκατεστημένης ισχύς των κύριων μηχανών μέσω των συντελεστών του Πίνακα 6.

Πίνακας 6 Μέση εκτιμώμενη αναλογία μεταξύ κύριων και βοηθητικών μηχανών

Κατηγορία Πλοίου	World fleet (2010)	Mediterranean Sea fleet (2006)
Liquid bulk ships	0.30	0.35
Dry bulk carriers	0.30	0.39
Container	0.25	0.27
General cargo	0.23	0.35
Ro-Ro cargo	0.24	0.39
Passenger	0.16	0.27
Fishing	0.39	0.47
Other	0.35	0.18
Tugs	0.10	

Επειδή το φορτίο των μηχανών δεν είναι ίδιο σε όλες τις δραστηριότητες ενός πλοίου, δίνονται επίσης και τα φορτία των κινητήρων ως ποσοστά της μέγιστης συνεχούς ισχύος (MCR), σύμφωνα με τον Πίνακα 7.

Πίνακας 7 Φορτίο μηχανών ως ποσοστό της μέγιστης συνεχούς ισχύος

Φάση	Φορτίο κύριας μηχανής (% MCR)	Ποσοστό χρόνου λειτουργίας της κύριας μηχανής (%)	Φορτίο βοηθητικών μηχανών (% MCR)
«Εν πλω»	80	100	30
Ελιγμών	20	100	50
Ελλιμενισμού (εκτός δεξαμενοπλοίων)	20	5	40
Ελλιμενισμού	20	100	60

(δεξαμενόπλοια)			
-----------------	--	--	--

Τέλος, στο εγχειρίδιο συμπεριλαμβάνεται και ένας πίνακας, ώστε να υπολογίζεται ο χρόνος που δαπανάτε σε κάθε φάση ανάλογα με τον τύπο πλοίου και τη μέση ταχύτητα αυτού.

Το συγκεκριμένο εγχειρίδιο, όπως αναφέρθηκε, δίνει τις παραπάνω κατευθυντήριες γραμμές ώστε τα αποτελέσματα υπολογισμών από διάφορες χώρες να είναι συγκρίσιμα. Στην παρούσα εργασία, θα γίνει μία διαφοροποίηση σε κάποιους από τους αναφερόμενους παράγοντες σύμφωνα με την 4^η έκθεση του IMO. Οι πληροφορίες που αντλούνται από τον IMO αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο.

6.3. 4^η Έκθεση GHG IMO

Η 4^η έκθεση του IMO βασίζεται στη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην 3^η Έκθεση [37], με την 4^η να υιοθετεί αλλαγές σε κάποιες μεταβλητές. Παρακάτω, αναλύεται η μεθοδολογία καθώς και οι διαφορές μεταξύ των μεθόδων.

Σύμφωνα με την 4^η Έκθεση του IMO, οι ωριαίες εκπομπές των μηχανών ενός πλοίου έχουν χωριστεί σε δύο κατηγορίες, με βάση τον τρόπο με τον οποίο αυτές οι εκπομπές υπολογίζονται πιο συχνά¹⁴. Οι δύο αυτές κατηγορίες είναι οι εξής:

- Με βάση την ενέργεια: Οι ρύποι υπολογίζονται ανάλογα με την ισχύ της μηχανής (\dot{W}), χρησιμοποιώντας έναν συντελεστή εκπομπής ρύπου βασισμένο στην ενέργεια (EF_e) σε μονάδες [g ρύπου / kWh]. Οι ωριαίες εκπομπές (EM_i) υπολογίζονται, έτσι, από τον ακόλουθο τύπο:

$$EM_i = EF_e \cdot \dot{W}_i \quad (6.6)$$

Οι ρύποι που εμπίπτουν αυτής της κατηγορίας είναι: τα οξείδια του αζώτου (NO_x), το μεθάνιο (CH_4), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το υποξείδιο του αζώτου (N_2O), αιωρούμενα σωματίδια ($PM_{2.5}$ και PM_{10}) και πτητικές οργανικές ενώσεις εκτός μεθανίου (NMVOC).

- Με βάση τα καύσιμα: Οι ρύποι υπολογίζονται ανάλογα με την ανάλογα με την ποσότητα του ρύπου που βρίσκεται στον τύπο καυσίμου και το είδος της μηχανής. Οι ωριαίες εκπομπές (EM_i) υπολογίζονται πολλαπλασιάζοντας την ωριαία κατανάλωση καυσίμου (FC_i) με έναν συντελεστή εκπομπής ρύπου βασισμένο στο καύσιμο (EF_f) σε μονάδες [g ρύπου / g καυσίμου], δηλαδή:

$$EM_i = FC_i \cdot EF_f \quad (6.7)$$

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν: το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), τα οξείδια του θείου (SO_x) και η αιθάλη (BC) για ναυτικούς κινητήρες diesel. Οι μηχανές LNG, οι ατμοστρόβιλοι και αεριοστρόβιλοι έχουν μόνο ενεργειακό συντελεστή εκπομπής για την αιθάλη, ο οποίος μπορεί να μετατραπεί σε συντελεστή με βάση το καύσιμο, μέσω παραδοχών για την ειδική κατανάλωση καυσίμου.

¹⁴ Ο διαχωρισμός αυτός είναι παρεμφερής με αυτόν που γίνεται στο εγχειρίδιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όπως περιεγράφηκε παραπάνω.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται χαρακτηριστικά αυτής της μεθόδου. Συγκεκριμένα, το πως υπολογίζεται η ισχύς της κύριας μηχανής, η διάκριση των φάσεων του ταξιδιού, η ισχύς των βοηθητικών μηχανών, η ειδική κατανάλωση καυσίμου, και οι συντελεστές εκπομπών.

Ισχύς Κύριας Μηχανής

Η ισχύς της κύριας μηχανής ενός πλοίου σύμφωνα με την 4^η Έκθεση του IMO δίνεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση (Admiralty formula):

$$\dot{W}_i = \frac{\delta_w \cdot \dot{W}_{ref} \cdot \left(\frac{t_i}{t_{ref}}\right)^m \cdot \left(\frac{v_i}{v_{ref}}\right)^n}{\eta_w \cdot \eta_f} \quad (6.8)$$

Όπου,

- \dot{W}_{ref} : Ισχύς αναφοράς (ονομαστική ισχύς) της κύριας μηχανής
- t_i : Στιγμιαίο βύθισμα του πλοίου κατά τον υπολογισμό
- v_i : Στιγμιαία ταχύτητα του πλοίου κατά τον υπολογισμό
- t_{ref} : Βύθισμα αναφοράς του πλοίου
- v_{ref} : Ταχύτητα αναφοράς (ονομαστική ταχύτητα) του πλοίου
- m : Εκθέτης λόγου βυθίσματος, $m = 0.66$
- n : Εκθέτης λόγου ταχύτητας, $n = 3$
- η_w : Συντελεστής επίδρασης του καιρού στην πρόωση του πλοίου
- η_f : Συντελεστής επίδρασης της ρύπανσης της γάστρας του πλοίου¹⁵
- δ_w : Διορθωτικός συντελεστής, εφαρμόζεται σε ορισμένους τύπους και μεγέθη πλοίων για να προσαρμοστεί η σχέση ταχύτητας-ισχύος. Συγκεκριμένα, για πλοία εμπορευματοκιβωτίων (μεγέθους 8 και 9), η τιμή του συντελεστή είναι $\delta_w = 0.75$, για κρουαζιερόπλοια (όλων των μεγεθών), η τιμή του συντελεστή είναι $\delta_w = 0.70$, και για τους υπόλοιπους τύπους πλοίων, $\delta_w = 1.00$.

Για την κύρια μηχανή γίνονται και οι εξής παραδοχές, όπου χρειάζεται:

- Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο εκτιμώμενος συντελεστής φόρτισης της κύριας μηχανής ενός πλοίου μπορεί να είναι μεγαλύτερος από το 100% του MCR της μηχανής, πράγμα που σημαίνει ότι το πλοίο χρησιμοποιεί περισσότερο από την εγκατεστημένη ισχύ του κινητήρα, που δεν είναι δυνατό. Έτσι, για να αποφευχθεί αυτό, στο μοντέλο της 4^{ης} Έκθεσης του IMO, ταχύτητες 1.5 φορές μεγαλύτερες από την ταχύτητα αναφοράς, αντικαθίστανται από τη μέγιστη ταχύτητα.
- Στην περίπτωση, όπου μετά την εφαρμογή των ανωτέρω διορθώσεων, ο συντελεστής φόρτισης της κύριας μηχανής είναι πάνω από το 100% του MCR, τότε αποδίδεται η τιμή του 98% του MCR.
- Μία ακόμη παραδοχή αυτού του μοντέλου είναι ότι μόνο οι κύρια / ες μηχανή / ες του πλοίου συμβάλουν στη πρόωση του, ενώ οι βοηθητικές μηχανές καλύπτουν αποκλειστικά την ζήτηση ηλεκτρικού ρεύματος του πλοίου.

¹⁵ Οι τιμές των συντελεστών η_w και η_f που χρησιμοποιούνται είναι σύμφωνα με την 3^η Έκθεση του IMO.

Συντελεστής Επίδρασης Καιρού (η_w)

Στην 3^η Έκθεση του IMO θεωρήθηκε ότι τα καιρικά φαινόμενα αυξάνουν κατά 15% την απαιτούμενη ισχύ, για πλοία που πλέουν σε απόσταση μεγαλύτερη των πέντε (5) ναυτικών μιλίων από την κοντινότερη στεριά. Ενώ, για πλοία που πλέουν σε ίση ή μικρότερη απόσταση, αυτή η αύξηση είναι 10%. Στην 4^η Έκθεση του IMO, θεωρήθηκαν οι ίδιες τιμές όπως στην 3^η, για διαφορετικούς τύπους πλοίων και μεγέθη.

Συντελεστής Επίδρασης Ρύπανσης Γάστρας (η_f)

Στην 3^η Έκθεση του IMO θεωρήθηκε αύξηση της αντίστασης του πλοίου κατά 9%, που αντιπροσώπευε τη ρύπανση της γάστρας. Στην μελέτη των Olmer et al. [38], ο συντελεστής επίδρασης ρύπανσης γάστρας υπολογίζεται ως συνάρτηση του μήκους του πλοίου, της αρχικής τραχύτητας γάστρας, και της χρονικής διάρκειας από τον πιο πρόσφατο δεξαμενισμό. Σύμφωνα με αυτόν τον υπολογισμό, η μέση τιμή αύξησης της απαιτούμενης ισχύος είναι κατά 7%, ενώ κυμαίνεται από 2%-11%. Στην 4^η Έκθεση του IMO, θεωρήθηκαν οι ίδιες τιμές όπως στην 3^η, για διαφορετικούς τύπους πλοίων και μεγέθη.

Διάκριση Φάσεων Ταξιδιού

Στην 4^η Έκθεση του IMO υιοθετούνται οι 5 φάσεις λειτουργίας της 3^{ης} Έκθεσης, δηλαδή, στο λιμάνι (at berth), σε αγκυροβόλιο (at anchor), φάση ελιγμών (maneuvering), σε αργή διέλευση (slow transit), και στη θάλασσα (at sea, normal cruising). Αλλά, τα κριτήρια για την διάκριση των φάσεων εμπλουτίζονται από την μελέτη των Olmer et al.[38], όπου εκτός από την ταχύτητα του πλοίου, προστίθεται το ποσοστό φόρτισης της κύριας μηχανής, και η απόσταση από το λιμάνι ή την ακτή. Στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 8, Πίνακας 9) παρουσιάζεται η διάκριση των φάσεων σύμφωνα με την 3^η και 4^η Έκθεση του IMO.

Πίνακας 8 Διάκριση φάσεων λειτουργίας σύμφωνα με την 3η Έκθεση του IMO

Ταχύτητα	Φάση
Μικρότερη του 1 κόμβου	Στο λιμάνι (at berth)
1 – 3 κόμβους	Στο αγκυροβόλιο (anchored)
Μεγαλύτερη των 3 κόμβων και μικρότερη του 20% του MCR	Ελιγμοί (maneuvering)
Μεταξύ 20% και 65% του MCR	Αργή διέλευση (slow transit)
Μεγαλύτερη του 65% του MCR	Πλεύση (normal cruising)

Πίνακας 9 Διάκριση φάσεων λειτουργίας σύμφωνα με την 4η Έκθεση του IMO

Ταχύτητα (kn)	Φόρτιση Κ.Μ.	Απόσταση από λιμάνι (nm)		Απόσταση από ακτή (nm)		
		≤ 1	1 – 5	≤ 1	1 – 5	≥ 5
1 ≤		At berth	At berth *	Anchored	Anchored	Anchored
(1 - 3]		Anchored	Anchored *	Anchored	Anchored	Anchored
(3 - 5]	≤ 0.65	Maneuvering	Maneuvering *	Maneuvering	Maneuvering	Slow transit
	≥ 0.65	Maneuvering	Maneuvering *	Maneuvering	Maneuvering	Normal cruising
> 5	≤ 0.65	Maneuvering	Slow transit *	Slow transit	Slow transit	Slow transit
	≥ 0.65	Maneuvering	Normal cruising *	Normal cruising *	Normal cruising *	Normal cruising *

*Ισχύει μόνο για δεξαμενόπλοια (tankers).

Ισχύς Βοηθητικών Μηχανών και Λεβήτων

Στην 4^η Έκθεση του IMO οι τιμές της ισχύος των βοηθητικών μηχανών και λεβήτων δίνονται, με βάση τις τιμές της 3^{ης} Έκθεσης του IMO, οι οποίες επικαιροποιήθηκαν από πρόσφατες μελέτες. Οι τιμές εξαρτώνται από τον τύπο πλοίου, το μέγεθος, και την κατάσταση λειτουργίας. Για να είναι η τιμή ισχύος των βοηθητικών μηχανών πιο αντιπροσωπευτική ακολουθείται το παρακάτω διάγραμμα αποφάσεων. Συγκεκριμένα,

- Όταν η ισχύς της κύριας μηχανής είναι μεταξύ 0 και 150 kW, τότε η ισχύς των βοηθητικών μηχανών και λεβήτων τίθεται ίση με μηδέν,
- Όταν η ισχύς της κύριας μηχανής είναι μεταξύ 150 και 500 kW, τότε η ισχύς των βοηθητικών κινητήρων τίθεται στο 5% της εγκατεστημένης ισχύος, και η ισχύς του λέβητα τίθεται σύμφωνα με τον αντίστοιχο πίνακα,
- Όταν η ισχύς της κύριας μηχανής είναι μεγαλύτερη των 500 kW, τότε οι τιμές της ισχύος για τις βοηθητικές μηχανές και τους λέβητες τίθενται σύμφωνα με τον αντίστοιχο πίνακα.

Κατανάλωση Καυσίμου

Η ωριαία κατανάλωση καυσίμου (FC_i) για την κύρια μηχανή, τη βοηθητική και τον λέβητα δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$FC_i = SFC_i \cdot \dot{W}_i \quad (6.9)$$

Όπου,

- \dot{W}_i : Ωριαία ισχύς
- SFC_i : Ωριαία ειδική κατανάλωση καυσίμου

Για την εύρεση της ωριαίας ειδικής κατανάλωσης καυσίμου χρησιμοποιείται η βασική ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFC_{base} – Specific Fuel Consumption baseline). Οι τιμές της βασικής ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, ανάλογα με τον τύπο της μηχανής και τον τύπο καυσίμου δίνονται στον Πίνακα 11.

Πίνακας 10 Τιμές της βασικής ειδικής κατανάλωσης καυσίμου σε g / kWh

Τύπος Μηχανής	Τύπος Καυσίμου	SFC_{base}
SSD	HFO	175
	MDO / MGO	165
MSD	HFO	185
	MDO / MGO	175
HSD	HFO	195
	MDO / MGO	185
Auxiliary engines	HFO	195
	MDO / MGO	185
Boilers	HFO	340
	MDO / MGO	320

Κατανάλωση Καυσίμου – Κύρια Μηχανή

Η ειδική κατανάλωση καυσίμου της κύριας μηχανής θεωρείται ότι μεταβάλλεται παραβολικά σε σχέση με το φορτίο της μηχανής, δηλαδή σε χαμηλά φορτία, η ειδική κατανάλωση είναι σε υψηλά επίπεδα, έπειτα μειώνεται φτάνοντας ένα ελάχιστο, και στη συνέχεια ακολουθεί ανοδική πορεία.

Η εμπειρική σχέση που έχει προκύψει από την 3^η Έκθεση του IMO δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$SFC_{ME,i} = SFC_{base} \cdot (0.455 \cdot Load_i^2 - 0.710 \cdot Load_i + 1.280) \quad (6.10)$$

Όπου,

- $Load_i$: η ωριαία φόρτιση της μηχανής, που δίνεται αναλογικά, με τιμές από το 0 έως το 1

Για φορτία μικρότερα του 7%, η κατανάλωση καυσίμου της κύριας μηχανής θεωρείται μηδενική. Τέτοια χαμηλά επίπεδα φορτίου συναντώνται όταν το πλοίο είναι είτε στο λιμάνι είτε στο αγκυροβόλιο, επομένως θεωρείται ότι η κατανάλωση καυσίμου και οι εκπομπές προέρχονται από τις βοηθητικές μηχανές και τους λέβητες.

Κατανάλωση Καυσίμου – Βοηθητικές Μηχανές και Λέβητες

Για τις βοηθητικές μηχανές και τους λέβητες θεωρείται, όπως και στην 3^η Έκθεση του IMO, ότι δεν υπάρχει εξάρτηση από το φορτίο τους, έτσι η ειδική κατανάλωση καυσίμου για αυτές τις μηχανές δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$FC_{AE|BO,i} = SFC_{base} \cdot \dot{W}_{AE|BO,i} \quad (6.11)$$

Όπου,

- $FC_{AE,i}$: Ωριαία ειδική κατανάλωση καυσίμου της βοηθητικής μηχανής
- $FC_{BO,i}$: Ωριαία ειδική κατανάλωση καυσίμου του λέβητα
- $\dot{W}_{AE,i}$: Ωριαία ισχύς της βοηθητικής μηχανής
- $\dot{W}_{BO,i}$: Ωριαία ισχύς του λέβητα

Συντελεστής Εκπομπής Ρύπου / Αερίου – Emission Factor

Για την εκτίμηση των εκπομπών, χρησιμοποιείται ο συντελεστής εκπομπής ρύπου, όπου κάθε αέριο / ρύπος έχει διαφορετικό συντελεστή. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αυτοί οι συντελεστές, αφού πρώτα παρουσιαστεί το πώς επηρεάζονται όταν η μηχανή λειτουργεί σε χαμηλά φορτία.

Συντελεστές Χαμηλού Φορτίου – Low Load Factors (LLF)

Οι συντελεστές εκπομπής αυξάνονται όταν τα φορτία της μηχανής είναι κάτω από το 20%, λόγω της χαμηλότερης απόδοσης της καύσης. Για να προσομοιωθεί αυτή η συμπεριφορά, χρησιμοποιούνται οι συντελεστές χαμηλού φορτίου, όπως αυτοί παρουσιάζονται στον Πίνακα 12. Σημειώνεται, όμως, ότι αν και στον πίνακα υπάρχουν τιμές για λειτουργία της κύριας μηχανής σε φορτία μικρότερα του 7%, αυτές οι τιμές δεν λαμβάνονται υπόψη, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Πίνακας 11 Συντελεστές χαμηλού φορτίου

Φόρτιση μηχανής	PM	NO _x	SO _x	CO ₂
-----------------	----	-----------------	-----------------	-----------------

<= 2%	7.29	4.63	1.00	1.00
3%	4.33	2.92	1.00	1.00
4%	3.09	2.21	1.00	1.00
5%	2.44	1.83	1.00	1.00
6%	2.04	1.6	1.00	1.00
7%	1.79	1.45	1.00	1.00
8%	1.61	1.35	1.00	1.00
9%	1.48	1.27	1.00	1.00
10%	1.38	1.22	1.00	1.00
11%	1.3	1.17	1.00	1.00
12%	1.24	1.14	1.00	1.00
13%	1.19	1.11	1.00	1.00
14%	1.15	1.08	1.00	1.00
15%	1.11	1.06	1.00	1.00
16%	1.08	1.05	1.00	1.00
17%	1.06	1.03	1.00	1.00
18%	1.04	1.02	1.00	1.00
19%	1.02	1.01	1.00	1.00
20%	1.00	1.00	1.00	1.00

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 12, στα οξείδια του θείου (SO_x) και στο διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), επειδή ο υπολογισμός τους γίνεται με βάση την κατανάλωση καυσίμου, η οποία είναι συνάρτηση του φορτίου του κινητήρα, δεν εφαρμόζεται συντελεστής χαμηλού φορτίου.

Συντελεστής Εκπομπής Διοξειδίου του Άνθρακα CO₂ (fuel-based)

Οι τιμές του συντελεστή εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα δίνονται στον παρακάτω πίνακα, ανάλογα με τον τύπο καυσίμου.

Πίνακας 12 Τιμές του συντελεστή εκπομπής CO₂

Τύπος Καυσίμου	Περιεκτικότητα σε Άνθρακα	EF _f [g CO ₂ / g fuel]
HFO	0.8493	3.114
MDO / MGO	0.8744	3.206
LNG	0.7500	2.750
LSHFO 1.0%	0.8493	3.114

Συντελεστής Εκπομπής Οξειδίων του Θείου SO_x (fuel-based)

Οι εκπομπές οξειδίων του θείου εξαρτώνται από την περιεκτικότητα σε θείο του καυσίμου, από την κατανάλωση καυσίμου, καθώς και από την ύπαρξη ή όχι συστημάτων καθαρισμού των καυσαερίων (scrubbers). Στην 4^η Έκθεση του IMO θεωρήθηκε ότι δεν χρησιμοποιήθηκαν scrubbers, αφού σχετική μελέτη είχε δείξει ότι έως το 2018 λιγότερο από το 1% του παγκόσμιου στόλου είχε εγκαταστήσει scrubbers. Επομένως, ο συντελεστής εκπομπής οξειδίων του θείου υπολογίζεται με βάση τον παρακάτω τύπο σε μονάδες [g SO_x / g καυσίμου], ως εξής:

$$EF_{f,SO_x} = 2 \cdot 0.97753 \cdot S \quad (6.12)$$

Αυτή η σχέση βασίζεται στην υπόθεση ότι το 97.753% του θείου από το καύσιμο μετατρέπεται σε SO_x, ενώ το «2» αντικατοπτρίζει την αναλογία του μοριακού βάρους του SO₂ σε θείο, αφού θεωρείται ότι στις εκπομπές των πλοίων η πλειονότητα των SO_x είναι SO₂. Ως «S» συμβολίζεται η περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο. Αξίζει να σημειωθεί ότι η περιεκτικότητα σε θείο των ναυτιλιακών καυσίμων δεν είναι σταθερή, όπως αυτό φαίνεται και στον Πίνακα 14.

Πίνακας 13 Παγκόσμια μέση περιεκτικότητα σε θείο ανά τύπο καυσίμου ανά έτος

Τύπος Καυσίμου	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
HFO	2.51	2.43	2.46	2.45	2.58	2.6	2.6
MDO / MGO	0.14	0.13	0.12	0.08	0.08	0.08	0.07

Συντελεστής Εκπομπής Οξειδίων του Αζώτου NO_x (energy-based)

Για τον συντελεστή εκπομπής οξειδίων του αζώτου, για μηχανές κύκλου Diesel, χρησιμοποιήθηκαν τα όρια του Κανονισμού 13 της MARPOL, τα οποία είναι συνεπή με την 3^η Έκθεση του IMO. Στον Πίνακα 15 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες τιμές.

Πίνακας 14 Τιμές του συντελεστή εκπομπής NO_x

Tier	Έτος κατασκευής πλοίου και έπειτα	EF _{e, NO_x} [g/kWh]		
		n < 130 [rpm]	n = 130 – 1999 [rpm]	n ≥ 2000
I	1 Ιανουαρίου 2000	17.0	45n ^(-0.2)	9.8
II	1 Ιανουαρίου 2011	14.4	44n ^(-0.23)	7.7
III	1 Ιανουαρίου 2016	3.4	9n ^(-0.2)	2.0

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι εκπομπές NO_x μπορούν να μειωθούν με τεχνολογίες επεξεργασίας καυσαερίων, όπως ανακυκλοφορία των καυσαερίων (Exhaust Gas Recirculation – EGR), ή επιλεκτική καταλυτική αναγωγή (Selective Catalytic Reduction – SCR). Επίσης, θεωρήθηκε για πλοία με κινητήρες Tier III, με σκοπό να αντικατοπτρίζονται οι τρέχουσες πρακτικές, ότι όταν λειτουργούν εκτός NECA, τα επίπεδα εκπομπών τους θα είναι τα ίδια με των κινητήρων Tier II, ενώ εντός NECA θα συμμορφώνονται με το όριο του κανονισμού.

Συντελεστής Εκπομπής Αιωρούμενων Σωματιδίων PM (energy-based)

Ο συντελεστής εκπομπής PM₁₀ δίνεται ως συνάρτηση της περιεκτικότητας σε θείο του καυσίμου. Για κινητήρες που χρησιμοποιούν καύσιμα HFO και MDO / MGO, ο συντελεστής εκπομπής PM₁₀ εκτιμάται από τους ακόλουθους τύπους και την περιεκτικότητα σε θείο του καυσίμου, όπως φαίνονται στον Πίνακα 14.

Για HFO,

$$EF_{e,PM_{10}} = 1.35 + SFC_i \cdot 7 \cdot 0.02247 \cdot (S - 0.0246) \quad (6.13)$$

Για MDO / MGO,

$$EF_{e,PM_{10}} = 0.23 + SFC_i \cdot 7 \cdot 0.02247 \cdot (S - 0.024) \quad (6.14)$$

Ο αριθμός 7 στις παραπάνω εξισώσεις προέρχεται από την αναλογία του μοριακού βάρους του θεικού PM και του θείου, ενώ το 0.02247 δείχνει την αναλογία του θείου στο καύσιμο που μετατρέπεται σε θεικό PM.

Οι εκπομπές των PM_{2.5} υπολογίζονται σύμφωνα με την υπόθεση ότι αντιπροσωπεύουν το 92% (m/m) των PM₁₀.

Συντελεστής Εκπομπής Μονοξειδίου του Άνθρακα CO (energy-based)

Στην 4^η Έκθεση του IMO προτείνεται να χρησιμοποιηθούν οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν και στη 3^η Έκθεση για τον συντελεστή εκπομπής μονοξειδίου του άνθρακα. Οι τιμές φαίνονται στον Πίνακα 15.

Πίνακας 15 Συντελεστής εκπομπής CO ανά τύπου κινητήρα και καύσιμο

Τύπος κινητήρα	HFO & LSHFO EF _e CO [g CO/ kWh]	MDO EF _e CO [g CO/ kWh]
SSD	0.540	0.044
MSD	0.540	0.046
HSD	0.540	0.540
Auxiliary Engine	0.540	0.540
Boiler and Steam Turbine	0.200	0.200

7. Περιγραφή Υπολογιστικού Εργαλείου Εκτίμησης Ρύπων

7.1. Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του υπολογιστικού εργαλείου για την εκτίμηση των ρύπων, σύμφωνα με τις προαναφερθείσες μεθοδολογίες, και αναλυτική αναφορά στα στοιχεία που χρειάστηκε να υπολογιστούν σε ενδιάμεσα στάδια, αλλά και τα απαραίτητα δεδομένα για να γίνει η εκτίμηση των ρύπων.

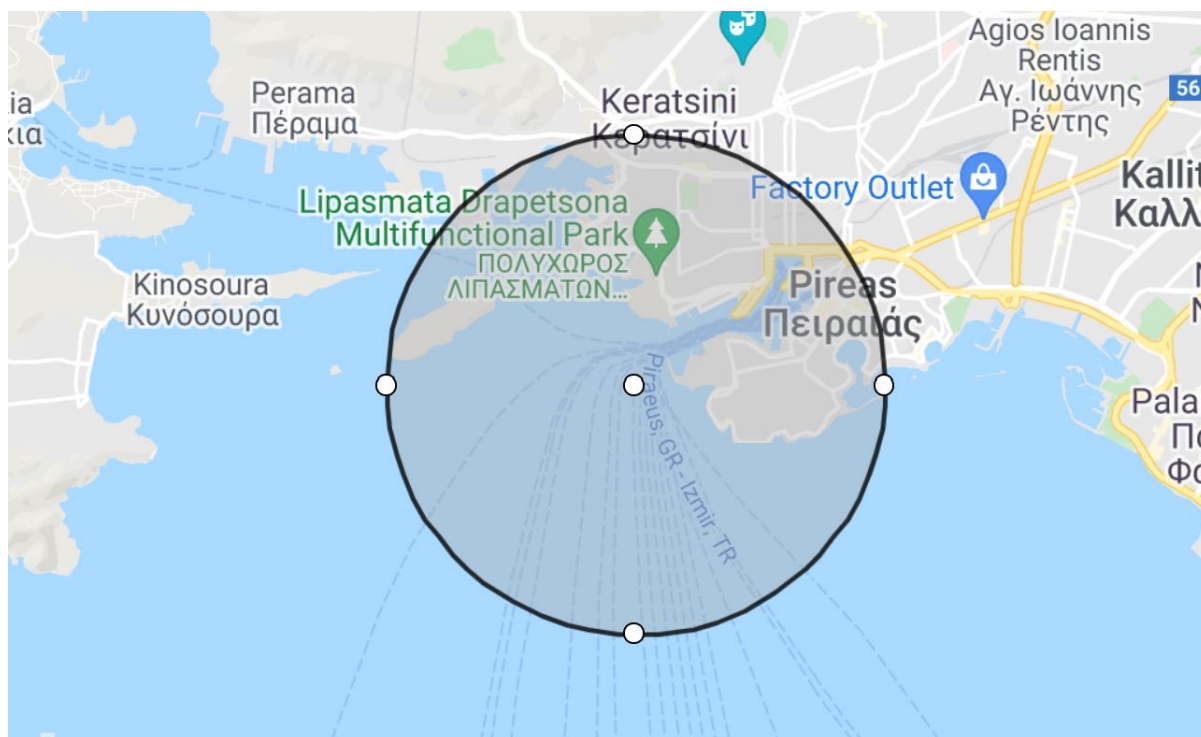
7.2. Περιγραφή Υπολογιστικού Εργαλείου

Το υπολογιστικό εργαλείο που αναπτύχθηκε, όπως έχει αναφερθεί, έχει σκοπό τον υπολογισμό των αέριων εκπομπών στην περιοχή του λιμένα του Πειραιά. Συγκεκριμένα, ο υπολογισμός αφορά τις εκπομπές από τα επιβατηγά και επιβατηγά – οχηματαγωγά πλοία και κρουαζιερόπλοια που προσεγγίζουν το λιμάνι του Πειραιά, δηλαδή το επιβατηγό κομμάτι αυτού. Σύμφωνα με τον IMO, οι συντεταγμένες του επιβατηγού λιμένα του Πειραιά είναι οι εξής:

Latitude: 37° 56.00' N

Longitude: 23° 37.00 E

Επιλέχθηκε ένας κύκλος με κέντρο τη παραπάνω θέση και ακτίνα 2.0 ναυτικών μιλίων για να μελετηθούν τα πλοία που προσεγγίζουν το λιμάνι. Στην Εικόνα 5 φαίνεται η περιοχή μελέτης.



Εικόνα 5 Χάρτης υπό μελέτη περιοχής

Αρχικά, εισάγονται στο πρόγραμμα στοιχεία σχετικά με τα πλοία, όπως αυτά φαίνονται στην παρακάτω λίστα, τα οποία αντλήθηκαν από το Clarkson’s Shipping Intelligence Network, μία διαδικτυακή πλατφόρμα με δεδομένα ευρείας γκάμας για την ναυτιλία.

Πίνακας 16 Δεδομένα εισαγωγής στοιχείων πλοίων

Δεδομένο	Μονάδα Μέτρησης	Τύπος Δεδομένου
Όνομα Πλοίου	-	string
Τύπος Πλοίου	-	string
Length BP	m	float
Beam	m	float
Draught	m	float
DWT	t	float
Year Built	-	int
Nominal Speed	kn	float
No of Main Engine(s)	-	int
No of Strokes	-	int
Main Engine’s Power	kW	float
RPM Main Engine	-	int
Fuel Main Engine	-	string
No of Auxiliary Engine(s)	-	int
Auxiliary Engine’s Power	kW	float
Fuel Auxiliary Engine	-	string
Scrubber Installed	-	string
Selective Catalytic Reduction (SCR) System Installed	-	string

Επίσης, εισάγονται στοιχεία για την δραστηριότητα / κίνηση των πλοίων, τα οποία καταγράφονται στην παρακάτω λίστα. Αυτά τα στοιχεία αντλήθηκαν από την ιστοσελίδα MarineTraffic, για την οποία γίνεται αναφορά στην επόμενη ενότητα.

Πίνακας 17 Δεδομένα εισαγωγής δραστηριότητας πλοίων

Δεδομένο	Μονάδα Μέτρησης	Τύπος Δεδομένου
Ημερομηνία και Ώρα	-	datetime
Στιγμιαία Ταχύτητα	kn	float
Γεωγραφικό μήκος	decimal degree	float
Γεωγραφικό πλάτος	decimal degree	float

Σύμφωνα με το γεωγραφικό μήκος και πλάτος ελέγχεται πότε το εκάστοτε πλοίο βρίσκεται εντός της περιοχής που ορίστηκε προηγουμένως, και εξάγεται ένα αρχείο το οποίο περιλαμβάνει μόνο την κίνηση του πλοίου εντός αυτής της περιοχής.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η ισχύς της κύριας μηχανής σύμφωνα με την εξίσωση (6.8). Οι τιμές των διορθωτικών συντελεστών επίδρασης καιρού και ρυπασμένης γάστρας, για επιβατηγά-οχηματαγωγά πλοία, δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 18 Τιμές συντελεστών επίδρασης καιρού και ρυπασμένης γάστρας

Τύπος Πλοίου	Χωρητικότητα	Μονάδα	n_w	n_f
Ferry-RoPax	0 – 1999	gt	0.909	0.917
	2000 – 4999		0.909	0.917

	5000 – 9999		0.909	0.917
	10000 – 19999		0.909	0.917
	20000 – +		0.909	0.917
Cruise	0 – 1999	gt	0.909	0.917
	2000 – 9999		0.867	0.917
	10000 - 59999		0.867	0.917
	60000 – 99999		0.867	0.917
	100000 – 149999		0.867	0.917
	150000 – +		0.867	0.917

Στην εξίσωση (6.8), συμπεριλαμβάνεται και το στιγμιαίο βύθισμα του πλοίου. Η αλλαγή του βυθίσματος του πλοίου επηρεάζει την βρεχόμενη επιφάνεια του πλοίου, άρα και τις απαιτήσεις ισχύος του πλοίου. Η τιμή του στιγμιαίου βυθίσματος σε αρκετές περιπτώσεις μπορεί να είναι είτε αβέβαιη είτε να μην υπάρχει. Γι' αυτό, οι Olmer et al. [38] εισήγαγαν έναν μέσο ετήσιο συντελεστή προσαρμογής του βυθίσματος, ώστε να μειωθεί η επίδραση λανθασμένων τιμών στιγμιαίου βυθίσματος. Οι τιμές του μέσου λόγου βυθίσματος για πλοία Ro-Pax, τα οποία δεν έχουν συνήθως ταξίδια σε κατάσταση ερματισμού, δίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 19 Μέσος λόγος βυθίσματος ανά έτος

Τύπος Πλοίου	2013	2014	2015
Ferry Ro-Pax	0.9528	0.9528	0.9459
Cruise	0.9866	0.9866	0.9799

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, θεωρείται η τιμή του λόγου βυθίσματος ίση με 0.9459 για τα επιβατηγά – οχηματαγωγά, και 0.9799 για τα κρουαζιερόπλοια.

Στη συνέχεια υπολογίζονται η ωριαία ειδική κατανάλωση καυσίμου της κύριας μηχανής και οι συντελεστές εκπομπής των υπό μελέτη ρύπων και αερίων. Οι συντελεστές εκπομπής υπολογίζονται σύμφωνα με την 4^η Έκθεση του IMO, εκτός από τις περιπτώσεις που αναφέρονται παρακάτω. Έχει θεωρηθεί ότι τα υπό μελέτη πλοία χρησιμοποιούν καύσιμα με περιεκτικότητα θείου όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 20).

Πίνακας 20 Τιμές Περιεκτικότητας θείου στα καύσιμα

Τύπος Καυσίμου	Περιεκτικότητα θείου %
HFO	3.5
IFO 380 / IFO 180	2.7
LSHFO	1.0
MDO / VLSFO	0.5
MGO / ULSFO	0.1

Για τα υπό μελέτη πλοία, στα οποία υπάρχει εγκατεστημένη μονάδα scrubber, θεωρείται 2.5% αύξηση στην κατανάλωση καυσίμου [19]. Επίσης, σύμφωνα με βιβλιογραφία, σε πλοία με εγκατεστημένη μονάδα scrubber, η μείωση των SOx είναι της τάξης του 90-95% και η μείωση των PM είναι της τάξης του 80-85% [39]. Όμως, πιο πρόσφατη έρευνα σχετικά με τα αιωρούμενα σωματίδια αναφέρει ότι με χρήση HFO σε συνδυασμό με scrubber η μείωση είναι της τάξης του 30-40% [40]. Στο υπολογιστικό εργαλείο θεωρείται ότι η μονάδα scrubber είναι σε λειτουργία μόνο όταν χρησιμοποιείται καύσιμο που δεν είναι σύμφωνο με τους κανονισμούς, δηλαδή με

περιεκτικότητα θείου μεγαλύτερη του 0.5% και 0.1% αντίστοιχα, όπου σε αυτή την περίπτωση θεωρείται μείωση των SOx κατά 93% και μείωση των PM κατά 40%.

Για τον συντελεστή εκπομπής PM₁₀ που δίνεται από τις εξισώσεις (6.13) και (6.14) για HFO και MDO/MGO αντίστοιχα, για καύσιμα με περιεκτικότητα θείου ίσης ή μικρότερης του 0.5% υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο (6.13) [41].

Όπως έχει αναφερθεί και στην προηγούμενη ενότητα, θεωρείται συντελεστής χαμηλού φορτίου για φορτία από 7% έως 20% για NOx και PM.

Σχετικά με το CO₂, υπολογίζονται οι εκπομπές του ισοδύναμου του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂e), ώστε να συμπεριληφθούν και οι επιδράσεις του μεθανίου (CH₄), αλλά και του υποξειδίου του αζώτου (N₂O). Οι συντελεστές μετατροπής για το ισοδύναμο του διοξειδίου του άνθρακα φαίνονται στον Πίνακα 19 [42].

Πίνακας 21 Συντελεστές μετατροπής για ισοδύναμο CO₂

Αέριο του θερμοκηπίου	Δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη (ΔΘΠ) ¹⁶
CO ₂	1
CH ₄	28
N ₂ O	265

Οι τελικές τιμές των συντελεστών εκπομπής CO₂e παρουσιάζονται στον Πίνακα 21 [43] σε [g CO₂e/ g καυσίμου]. Οι τιμές προκύπτουν ως άθροισμα των γινομένων των συντελεστών εκπομπής κάθε αερίου με το αντίστοιχο δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη.

Πίνακας 22 Συντελεστές εκπομπής CO₂e ανάλογα με τον τύπο καυσίμου

Αέριο του θερμοκηπίου	HFO / LSHFO	MDO / MGO
CO ₂	3.114	3.206
CH ₄	0.00006	0.00006
N ₂ O	0.00016	0.00015
CO ₂ e	3.16318	3.2522

Για τις βοηθητικές μηχανές και τους λέβητες, η ισχύς τους δίνεται από τον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 23) σύμφωνα με την 4^η Έκθεση του IMO, και στη συνέχεια υπολογίζονται αναλόγως η κατανάλωση καυσίμου από τις βοηθητικές μηχανές, καθώς και οι συντελεστές εκπομπής των υπό μελέτη ρύπων και αερίων.

Πίνακας 23 Ισχύς βοηθητικών μηχανών και λεβήτων

Τύπος Πλοίου	Χωρητικ ·	Μον ·	Ισχύς λέβητα (kW)				Ισχύς βοηθητικής μηχανής (kW)			
			At berth	Anchore d	Maneuverin g	Se a	At berth	Anchore d	Maneuverin g	Sea
Ferry Ro- Pax	0 - 1999	gt	260	250	170	0	105	105	105	105
	2000 -		260	250	170	0	330	330	330	330

¹⁶ Το δυναμικό θέρμανσης του κλίματος ενός αερίου του θερμοκηπίου σε σχέση με το αντίστοιχο δυναμικό του διοξειδίου του άνθρακα. Υπολογίζεται ως το δυναμικό θέρμανσης εντός 100 ετών ενός χιλιόγραμμου αερίου σε σχέση με ένα χιλιόγραμμο CO₂ [42].

	4999									
	5000 - 9999		260	250	170	0	670	670	670	670
	10000 - 19999		390	380	260	0	1100	1100	1100	1100
	20000 - +		390	380	260	0	1950	1950	1950	1950
Cruise	0 - 1999	gt	110 0	950	980	0	450	450	580	450
	2000 - 9999		110 0	950	980	0	450	450	580	450
	10000 - 59999		110 0	950	980	0	3500	3500	5500	3500
	60000 - 99999		110 0	950	980	0	1150 0	11500	14900	1150 0
	100000 - 149999		110 0	950	980	0	1150 0	11500	14900	1150 0
	150000 - +		110 0	950	980	0	1150 0	11500	14900	1150 0

Στο τελικό στάδιο, υπολογίζονται οι συνολικές εκπομπές ενός πλοίου, στην υπό μελέτη περιοχή.

7.3. Γλώσσα Προγραμματισμού Python

Το υπολογιστικό εργαλείο υπολογισμού των αέριων εκπομπών αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Python [44], και συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 3.8. Ο κώδικας αναπτύχθηκε στο JupyterLab μέσω του ολοκληρωμένου πακέτου Anaconda [45], που είναι μία δωρεάν και ανοιχτή διανομή πηγών των γλωσσών προγραμματισμού Python και R. Επιλέχθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Python, η οποία αποτελεί παράδειγμα ελεύθερου λογισμικού και λογισμικού ανοικτού κώδικα (ΕΛΛΑΚ) και η οποία συνδυάζει την απλότητα, την ευκολία αναγνωσιμότητας και χρήσης. Η γλώσσα προγραμματισμού Python διακρίνεται λόγω του ότι έχει πολλές βιβλιοθήκες που διευκολύνουν ιδιαίτερα συνηθισμένες εργασίες. Επίσης, είναι ιδιαίτερα εύχρηστη στη διαχείριση αρχείων και λιστών δεδομένων με κύριο χαρακτηριστικό της τον χρόνο απόδοσης. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στις βιβλιοθήκες που χρησιμοποιήθηκαν.

Βιβλιοθήκη NumPy

Η βιβλιοθήκη NumPy [46] αποτελεί τη βασικότερη βιβλιοθήκη της Python για αριθμητικούς υπολογισμούς υψηλής απόδοσης, παρέχει υποστήριξη για συναρτήσεις και δομές δεδομένων για την υποστήριξη μεγάλων, πολυδιάστατων μητρών (matrices) και τις απαραίτητες πράξεις και τελεστές για τον χειρισμό τους .

Βιβλιοθήκη Pandas

Η βιβλιοθήκη Pandas [47] παρέχει συναρτήσεις και δομές δεδομένων για την εύκολη ανάγνωση δεδομένων από αρχεία (π.χ. csv) και χειρισμό αυτών, για παράδειγμα παρέχει τον τύπο δεδομένων DataFrame που παρέχει και η R, επιτρέποντας τον εύκολο χειρισμό δεδομένων, τη λήψη υποσυνόλου δεδομένων, τον χειρισμό χρονοσειρών, και άλλα. Η βιβλιοθήκη Pandas είναι χτισμένη πάνω στη NumPy.

Βιβλιοθήκη SciPy

Η βιβλιοθήκη SciPy [48] είναι και αυτή χτισμένη πάνω στη NumPy, από την οποία εξαρτάται καθώς τα πολυδιάστατα arrays αποτελούν θεμελιώδη δομή της SciPy. Η βιβλιοθήκη SciPy περιέχει συναρτήσεις που υποστηρίζουν την επίλυση σειρών κατηγοριών προβλημάτων όπως, βελτιστοποίηση, ολοκλήρωση, παρεμβολή (που χρησιμοποιήθηκε στον κώδικα), επεξεργασία σήματος και εικόνας, επίλυση κανονικών εξισώσεων. Η βιβλιοθήκη αποτελείται από έναν πυρήνα και από μία σειρά από αλληλεξαρτώμενα πακέτα (modules). Αυτό που χρησιμοποιήθηκε στον κώδικα είναι το πακέτο interpolate.

Βιβλιοθήκη Matplotlib

Η βιβλιοθήκη Matplotlib [49] είναι μία βιβλιοθήκη δημιουργίας δισδιάστατων και τρισδιάστατων γραφικών της Python, εμπνευσμένη από το MATLAB, και αποτελεί φυσική επέκταση της βιβλιοθήκης NumPy, πάνω στην οποία είναι χτισμένη. Η Matplotlib επιτρέπει τη δημιουργία εύρους διαγραμμάτων, όπως γραφήματα γραμμών, διαγράμματα πίτας, ιστογράμματα και άλλα, τα οποία δίνεται η δυνατότητα να αποθηκευτούν και σε αρχεία εικόνων. Οι τρεις βιβλιοθήκες NumPy, SciPy, και matplotlib χρησιμοποιούνται συνήθως ταυτόχρονα. Η βιβλιοθήκη διαθέτει το ειδικό κέλυφος αλληλεπίδρασης Pyplot, το οποίο προσομοιάζει την λειτουργικότητα του MATLAB.

Βιβλιοθήκη Basemap

Η βιβλιοθήκη Basemap προσφέρεται από τη βασική βιβλιοθήκη matplotlib και αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο που αφορά τον σχεδιασμό και την απεικόνιση δισδιάστατων χαρτών, μέσω 25 διαφορετικών προβολών που περιέχει. Παράλληλα, δίνει την δυνατότητα να σχεδιαστούν διάφορα χαρακτηριστικά του χάρτη όπως οι παράλληλοι, οι μεσημβρινοί, καθώς και διάφορα σημεία πάνω στον χάρτη χρησιμοποιώντας γεωγραφικές συντεταγμένες.

Βιβλιοθήκη Haversine

Η συγκεκριμένη βιβλιοθήκη χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ δύο σημείων πάνω στη Γη [50]. Αναφέρεται στη γνωστή φόρμουλα Haversine που χρησιμοποιείται για να καθορίσει τη μικρότερη απόσταση πάνω στην επιφάνεια της Γης μεταξύ δύο σημείων, μέσω του μεγάλου κύκλου.

7.4. Αυτόματο Σύστημα Αναγνώρισης Πλοίων (AIS)

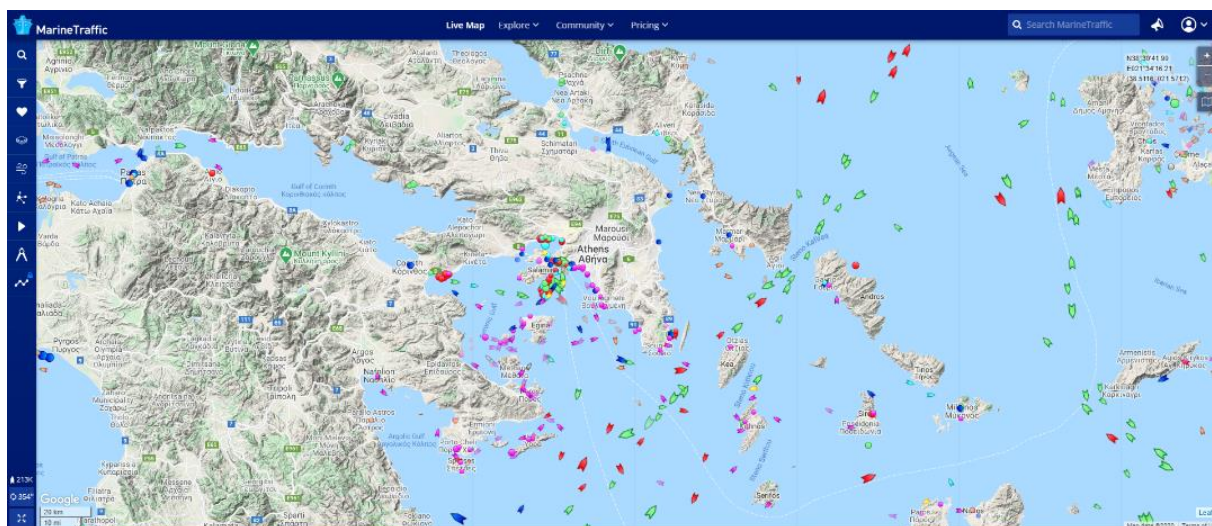
Η μέθοδος εκτίμησης ρύπων που αναπτύχθηκε βασίζεται στην δραστηριότητα των πλοίων, για την οποία, δεδομένα ανακτήθηκαν από το αυτόματο σύστημα αναγνώρισης των πλοίων (AIS – Automatic Identification System).

Το αυτόματο σύστημα αναγνώρισης πλοίων είναι ένα σύστημα αυτόματης ανταλλαγής ψηφιακών σημάτων μεταξύ πλοίων, αλλά και παράκτιων συστημάτων κυκλοφορίας πλοίων, στη συχνότητα των υπερβραχέων κυμάτων (VHF). Από το 2004, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός υποχρέωσε όλα τα πλοία, ολικής χωρητικότητας άνω των 300 GT, να είναι εξοπλισμένα με σύστημα αυτόματης αναγνώρισης [51]. Αρχικά, η χρήση του έγινε με στόχο την αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ των πλοίων μέσω των υπηρεσιών θαλάσσιας κυκλοφορίας (Vessel Traffic Services, VTS). Τα στοιχεία που παρέχει το σύστημα μπορούν να χρησιμοποιηθούν βέβαια και με άλλους τρόπους, όπως για την ταυτοποίηση και τον εντοπισμό πλοίων.

Το αυτόματο σύστημα αναγνώρισης πλοίων προσφέρει τη δυνατότητα έγκυρης πληροφόρησης σχετικά με:

- δυναμικά δεδομένα, όπως η θέση του πλοίου (γεωγραφικό πλάτος και μήκος), η πορεία, και η ταχύτητα, την αντίστοιχη ημερομηνία και ώρα,
- στατικά δεδομένα, όπως το όνομα, ο αριθμός αναγνώρισης του IMO, το Διεθνές Διακριτικό Σήμα, οι διαστάσεις και ο τύπος του πλοίου, καθώς και,
- δεδομένα σχετικά με τον αναμενόμενο χρόνο άφιξης του πλοίου, το ταξίδι, τον προορισμό.

Η ιστοσελίδα MarineTraffic [52] συλλέγει και επεξεργάζεται σήματα AIS. Δεδομένα όπως η θέση, η ταχύτητα, η κατάσταση πλεύσης, καθώς και άλλες πληροφορίες για κάθε πλοίο, όπως τα χαρακτηριστικά του, υπάρχουν στην ιστοσελίδα. Με τη βοήθεια του Google Map API, η θέση των πλοίων φαίνεται στον χάρτη.



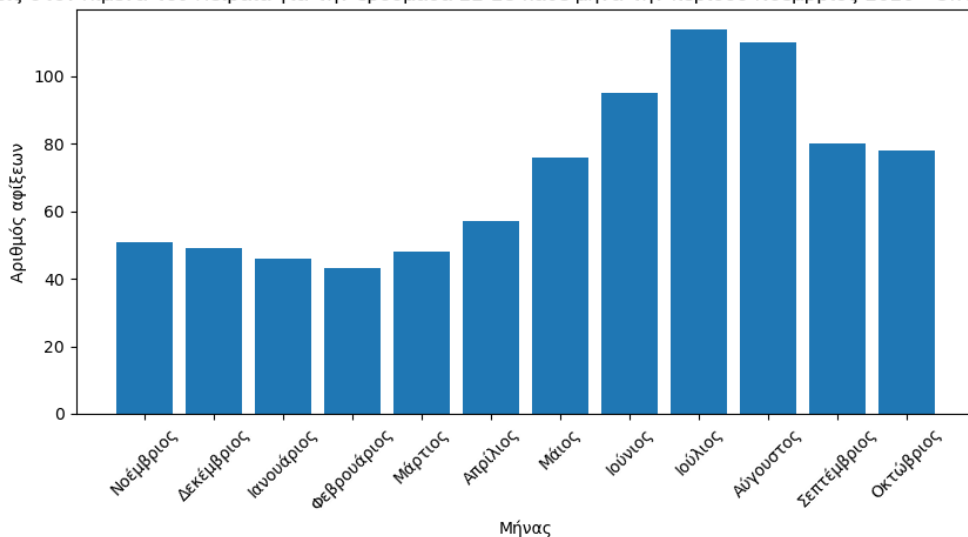
Εικόνα 6 Απεικόνιση πλοίων μέσω AIS

Αρχικά, συγκεντρώθηκαν στοιχεία για το έτος Νοέμβριος 2020 – Οκτώβριος 2021, σχετικά με τις αφίξεις και τις αναχωρήσεις επιβατικών πλοίων και κρουαζιερόπλοιων, με ολική χωρητικότητα άνω των 5000 τόνων¹⁷, από τον λιμένα του Πειραιά. Συγκεκριμένα, για κάθε μήνα του χρόνου,

¹⁷ Αυτή η επιλογή έγινε για να υπάρχει συμφωνία με τον Κανονισμό 2015/757, που ακολουθείται και στο EU MRV.

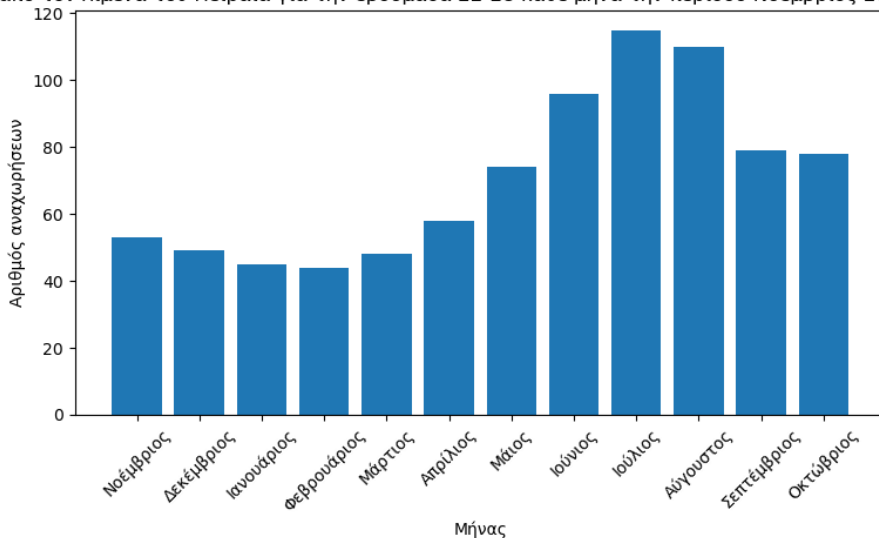
μελετήθηκε η τελευταία εβδομάδα, δηλαδή οι ημερομηνίες 22-28 του μήνα. Στα επόμενα γραφήματα, Γράφημα 5 και Γράφημα 6, παρουσιάζονται οι αφίξεις και οι αναχωρήσεις στον λιμένα του Πειραιά. Όπως φαίνεται, μετά τον Απρίλιο 2021 παρουσιάζεται μία αύξηση στην κίνηση επιβατικών πλοίων στον λιμένα. Συνολικά μελετήθηκαν 823 αφίξεις και οι ανάλογες αναχωρήσεις τους.

Αφίξεις στον λιμένα του Πειραιά για την εβδομάδα 22-28 κάθε μήνα την περίοδο Νοέμβριος 2020 - Οκτώβριος 2021



Γράφημα 5 Αφίξεις στον λιμένα του Πειραιά

Αναχωρήσεις από τον λιμένα του Πειραιά για την εβδομάδα 22-28 κάθε μήνα την περίοδο Νοέμβριος 2020 - Οκτώβριος 2021



Γράφημα 6 Αναχωρήσεις από τον λιμένα του Πειραιά

7.5. Βάση Δεδομένων

Για τη συλλογή δεδομένων, για τα πλοία, χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων Shipping Intelligence Network (SIN) της Clarkson Research [53], το οποίο αποτελεί μία ολοκληρωμένη πηγή δεδομένων

για τη ναυτιλία. Τα στοιχεία που αντλήθηκαν αφορούν χαρακτηριστικά των πλοίων, όπως όνομα, αριθμός IMO, διαστάσεις, χωρητικότητα, έτος ναυπήγησης, αλλά και στοιχεία σχετικά με τις κύριες και βοηθητικές μηχανές, καθώς και για εγκατάσταση ή μη συστημάτων, όπως scrubber, και άλλα. Τα παραπάνω στοιχεία συλλέχθηκαν μέσω της συνδρομής της Σχολής N.M.M.. Τα στοιχεία συλλέχθηκαν για πλοία τα οποία κατά το έτος 2020 είχαν προσεγγίσει το λιμάνι του Πειραιά, σύμφωνα με τα στοιχεία του MarineTraffic.

7.6. Δεδομένα Εξόδου

Τα δεδομένα εξόδου περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα του υπολογιστικού εργαλείου, καθώς και ενδιάμεσους υπολογισμούς. Συγκεκριμένα, δημιουργούνται αρχεία excel, ένα για κάθε πλοίο (με όνομα αρχείου το "output_IMOnumber"), όπου περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα και όλους τους ενδιάμεσους υπολογισμούς για κάθε μία προσέγγιση του πλοίου στον λιμένα κατά τη διάρκεια του έτους, καθώς επίσης και ένα αρχείο excel (με όνομα αρχείου "results") με τα συνολικά αποτελέσματα, για κάθε άφιξη και αναχώρηση από τον λιμένα του Πειραιά. Τέλος, δημιουργούνται 12 ακόμη αρχεία excel (όνομα αρχείου "month_year") ξεχωριστά για κάθε μήνα που περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα ανά μήνα.

Όλα τα στοιχεία από τα παραπάνω αρχεία χρησιμοποιούνται για να παραχθούν τα διαγράμματα της επόμενης ενότητας, ώστε να είναι εύκολη η σύγκριση μεταξύ των παραγόμενων ρύπων, και η συσχέτιση διάφορων χαρακτηριστικών με αυτά όπως ο τύπος πλοίου, επιβατηγό-οχηματαγωγό (RoPax) ή κρουαζιερόπλοιο, ή η φάση λειτουργίας.

8. Αποτελέσματα Υπολογιστικού Εργαλείου Εκτίμησης Ρύπων

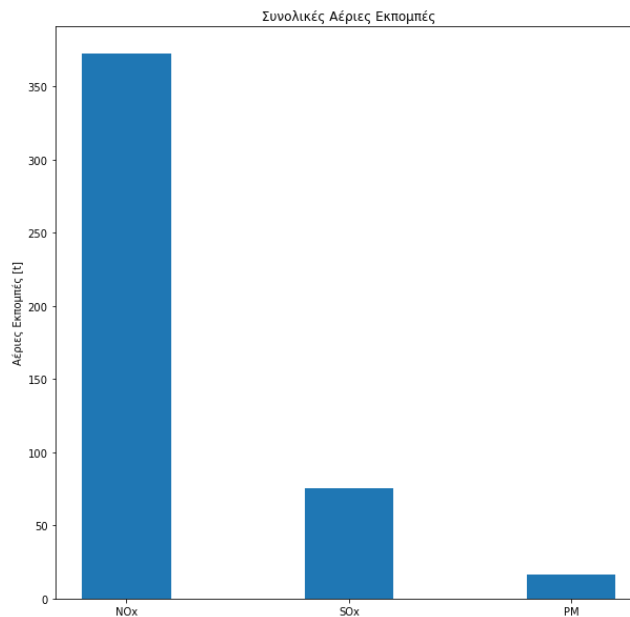
8.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του υπολογιστικού εργαλείου, όπως προέκυψαν σύμφωνα με την παραπάνω περιγραφή. Συνοψίζοντας, δηλαδή, μελετήθηκαν οι αέριες εκπομπές στον επιβατικό λιμένα του Πειραιά. Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε βασίζεται στη δραστηριότητα των πλοίων κατά την είσοδο, την παραμονή, και την έξοδο από τα όρια του λιμένα, στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρήθηκε απόσταση 2 ναυτικών μιλίων. Τα πλοία που συμμετείχαν στη συγκεκριμένη μελέτη είναι επιβατηγά – οχηματαγωγά πλοία (Ro-Pax Vessels) και κρουαζιερόπλοια (Cruise Ships), με ολική χωρητικότητα άνω των 5000 τόνων, τα οποία προσέγγισαν το λιμάνι κατά την χρονική περίοδο από τον Νοέμβριο 2020 έως τον Οκτώβριο 2021 την εβδομάδα 22 – 28 για κάθε ένα από τους εξεταζόμενους μήνες.

8.2. Ανάλυση Αποτελεσμάτων

8.2.1. Συνολικά Αποτελέσματα Αέριων Εκπομπών

Το Γράφημα 7 δείχνει ότι ο τύπος ρύπων που παράγεται περισσότερο είναι τα οξείδια του αζώτου (NOx), έπειτα ακολουθούν τα οξείδια του θείου (SOx), το οποίο συμβαίνει αφού τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται είναι σύμφωνα με την νομοθεσία. Τέλος, ακολουθούν τα αιωρούμενα σωματίδια (PM), όπου είναι το άθροισμα των PM2.5 και PM10 που υπολογίζονται στο πρόγραμμα. Επίσης, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και στον παρακάτω πίνακα.



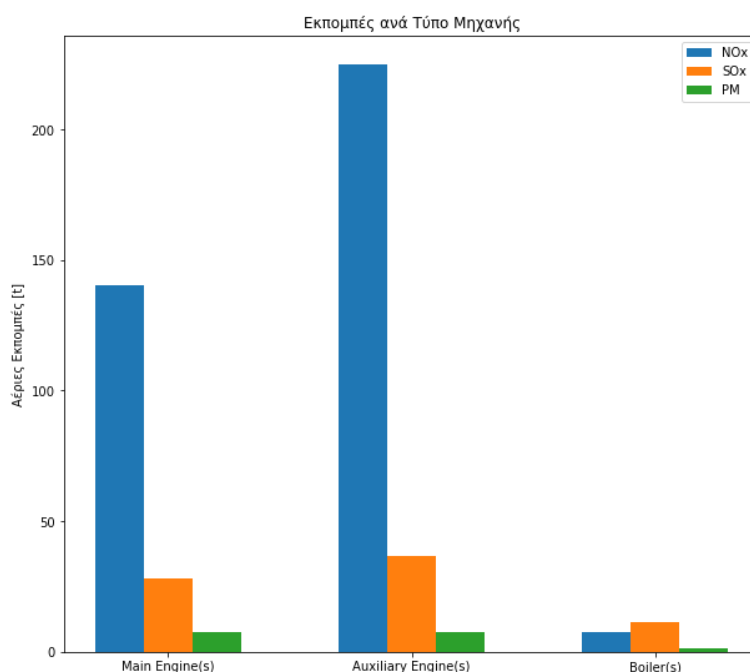
Γράφημα 7 Συνολικές αέριες εκπομπές

Πίνακας 24 Υπολογιζόμενες αέριες εκπομπές

Οξείδια του Αζώτου (NO _x)	373 [t]
Οξείδια του Θείου (SO _x)	76 [t]
Αιωρούμενα Σωματίδια (PM)	16 [t]
Ισοδύναμο Διοξείδιο του Άνθρακα (CO _{2e})	24990 [t]

8.2.2. Σύγκριση Αποτελεσμάτων ανά Τύπο Μηχανής

Στα επόμενα δύο διαγράμματα μελετώνται οι εκπομπές όπως προκύπτουν από τη λειτουργία των κύριων μηχανών (Main Engine(s)), των βοηθητικών μηχανών (Auxiliary Engine(s)), και των λεβήτων (Boiler(s)). Ο συγκεκριμένος διαχωρισμός μπορεί να δώσει χρήσιμα συμπεράσματα για τη λήψη μέτρων περιορισμού της ρύπανσης από τη λειτουργία των πλοίων.



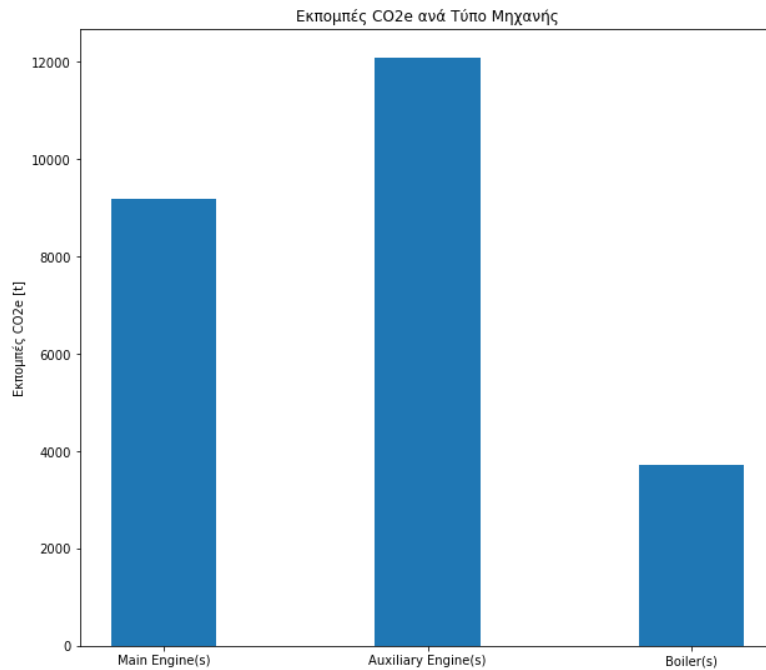
Γράφημα 8 Σύγκριση εκπομπών ανά τύπο μηχανής

Παρατηρείται, λοιπόν, ότι οι εκπομπές (NO_x, SO_x, PM) από τις βοηθητικές μηχανές είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις εκπομπές των κύριων μηχανών, ενώ οι λέβητες εκπέμπουν πολύ μικρές ποσότητες συγκριτικά και με τις δύο άλλες κατηγορίες. Το γεγονός αυτό για τις βοηθητικές μηχανές εξηγείται καθώς ο συντελεστής φορτίου των κυρίων μηχανών είναι μηδενικός ή σχεδόν μηδενικός κατά τη διάρκεια του ελλιμενισμού, όπου η συγκεκριμένη φάση έχει την μεγαλύτερη διάρκεια. Αντίθετα, οι βοηθητικές μηχανές συνεχίζουν να λειτουργούν κατά την παραμονή των πλοίων στο λιμάνι για την κάλυψη των αναγκών των διάφορων συστημάτων των πλοίων.

Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν και για τα αέρια του θερμοκηπίου, όπως φαίνεται στο Γράφημα 9.

Το γεγονός ότι η εκπομπή ρύπων από τις βοηθητικές μηχανές αποτελεί το υψηλότερο ποσοστό συγκριτικά με τους υπόλοιπους τύπους μηχανών, μπορεί να οδηγήσει και σε ανάλογες εφαρμογές

με σκοπό τη μείωση τους, όπως για παράδειγμα η σύνδεση με εξωτερική τροφοδοσία ρεύματος (cold ironing).

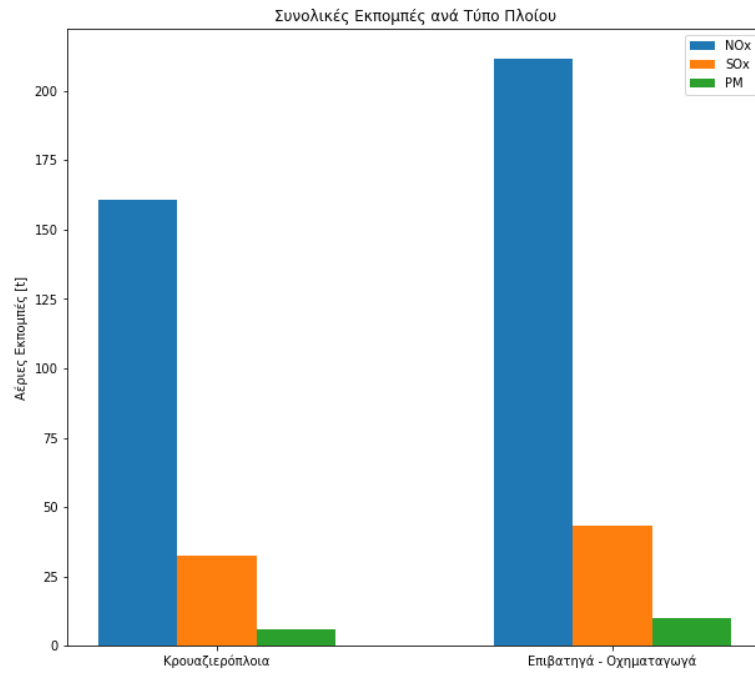


Γράφημα 9 Σύγκριση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ανά τύπο μηχανής

8.2.3. Σύγκριση Αποτελεσμάτων ανά Τύπο Πλοίου

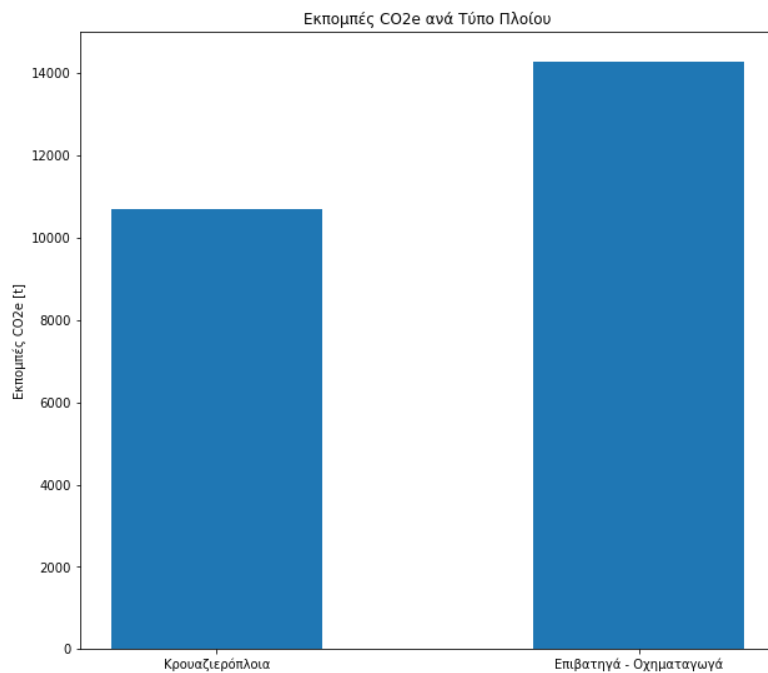
Στα επόμενα γραφήματα παρουσιάζονται οι εκπομπές ανά τύπο πλοίου, δηλαδή είτε κρουαζιερόπλοια είτε επιβατηγά – οχηματαγωγά πλοία. Στο Γράφημα 10 παρουσιάζονται οι εκπομπές των NOx, SOx, και PM, ανά τύπο πλοίου, όπου φαίνεται ότι τα επιβατηγά – οχηματαγωγά πλοία εκπέμπουν περισσότερους ρύπους.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν συμφωνούν με την σχετική μελέτη για το λιμάνι του Πειραιά [32] όπου συνολικά υπολογίστηκε ότι οι εκπομπές της ακτοπλοΐας είναι διπλάσιες από τις εκπομπές των κρουαζιερόπλοιων. Ειδικά, πρέπει να συνηπολογιστεί ότι τα πλοία που μελετώνται στην παρούσα διπλωματική, έχουν ολική χωρητικότητα άνω των 5000 τόνων, αρά δεν έχουν υπολογιστεί οι εκπομπές από μικρότερα πλοία, τα οποία όμως έχουν αποτελούν σημαντικό ποσοστό των αέριων εκπομπών στο λιμάνι του Πειραιά.



Γράφημα 10 Σύγκριση συνολικών εκπομπών ανά τύπο πλοίου

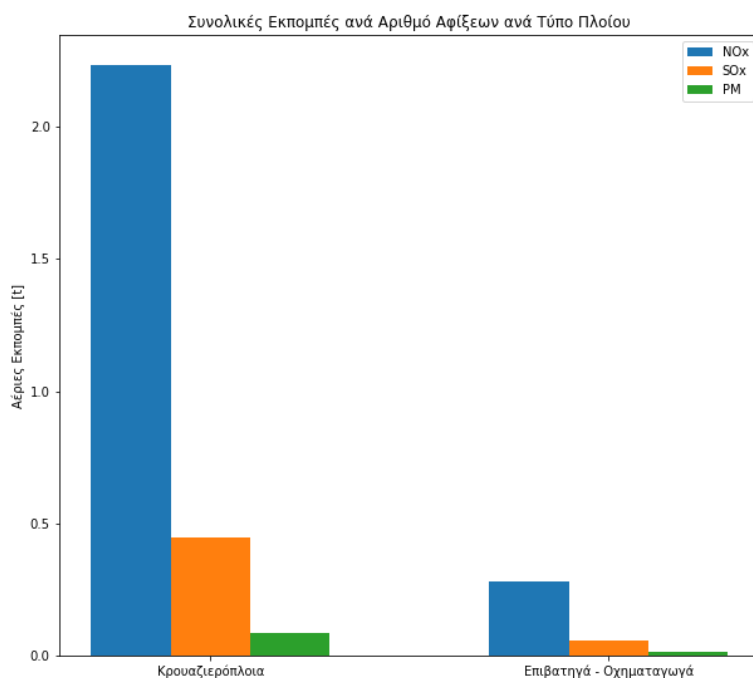
Αντίστοιχα αποτελέσματα φαίνονται στο Γράφημα 11 για τα αέρια των θερμοκηπίων.



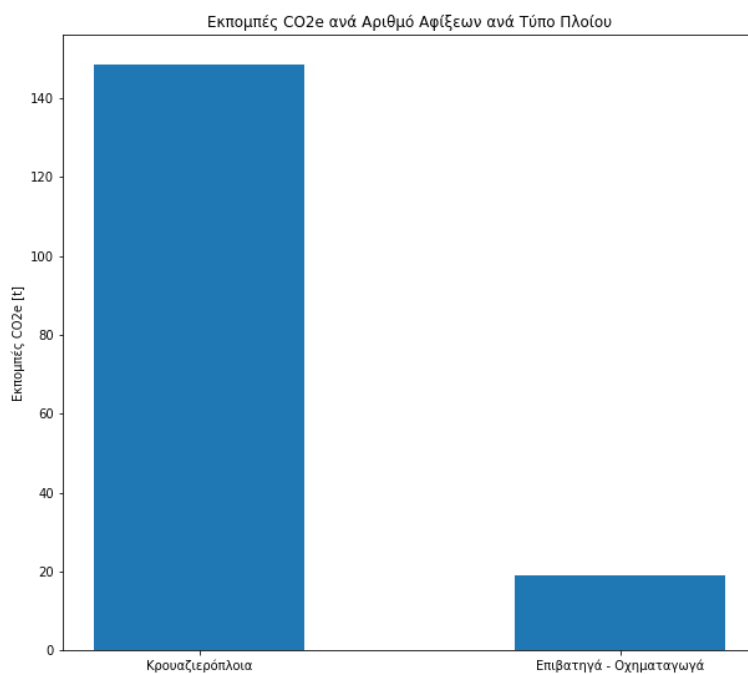
Γράφημα 11 Σύγκριση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ανά τύπο πλοίου

Τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτουν επίσης και από το γεγονός ότι από τις συνολικές αφίξεις που μελετήθηκαν το 91.25 % αφορούν επιβατηγά – οχηματαγωγά πλοία, και το υπόλοιπο 8.75 % των αφίξεων αντιπροσωπεύει τα κρουαζιερόπλοια. Επομένως, όταν οι παραπάνω εκπομπές μελετώνται ως προς τις αντίστοιχες αφίξεις προκύπτουν τα παρακάτω γραφήματα.

Στο Γράφημα 12 και στο Γράφημα 13 παρατηρείται ότι τελικά το μέσο κρουαζιερόπλοιο εκπέμπει περισσότερους ρύπους και αέρια από ότι το μέσο επιβατηγό – οχηματαγωγό πλοίο, σε κάθε άφιξη του. Αυτό προκύπτει αφού η συνολική διάρκεια παραμονής των κρουαζιερόπλοιων στο λιμάνι είναι μεγαλύτερη από αυτή των επιβατηγών – οχηματαγωγών πλοίων.



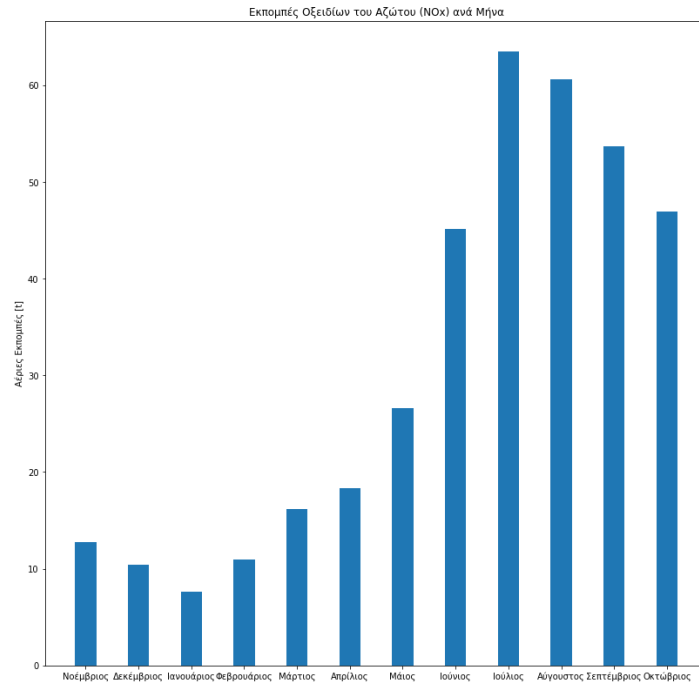
Γράφημα 12 Σύγκριση συνολικών εκπομπών ανά αριθμό αφίξεων ανά τύπο πλοίου



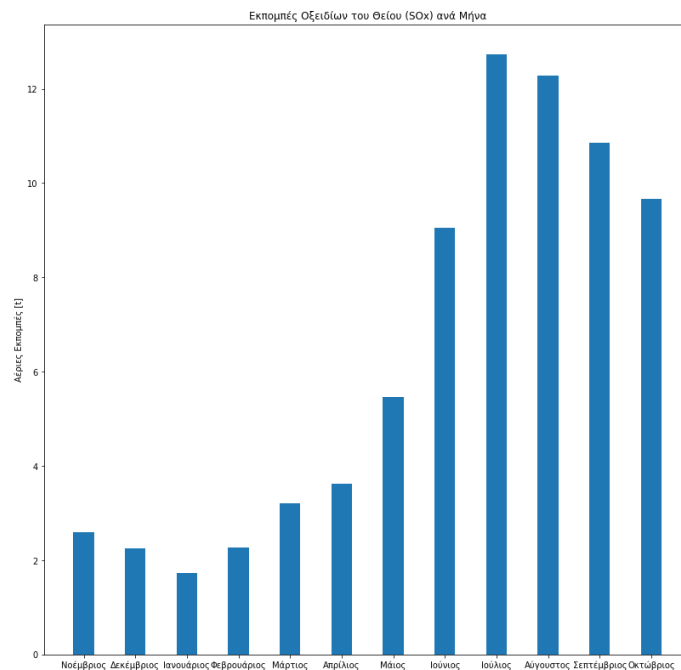
Γράφημα 13 Σύγκριση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ανά αριθμό αφίξεων ανά τύπο πλοίου

8.2.4. Σύγκριση Αποτελεσμάτων ανά Μήνα

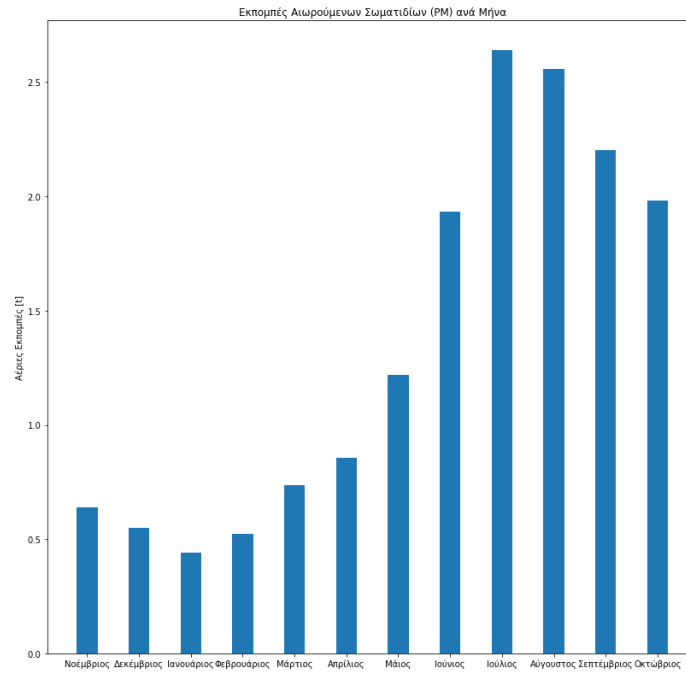
Τα επόμενα τέσσερα (4) γραφήματα παρουσιάζουν την κατανομή των εκπομπών κατά την περίοδο του έτους. Το αποτέλεσμα είναι σύμφωνο με τον αριθμό των αφίξεων κάθε μήνα όπου κατά την θερινή περίοδο είναι αυξημένες οι αφίξεις, άρα και η κίνηση στον λιμάνι, επομένως είναι αυξημένες και οι προς μελέτη εκπομπές.



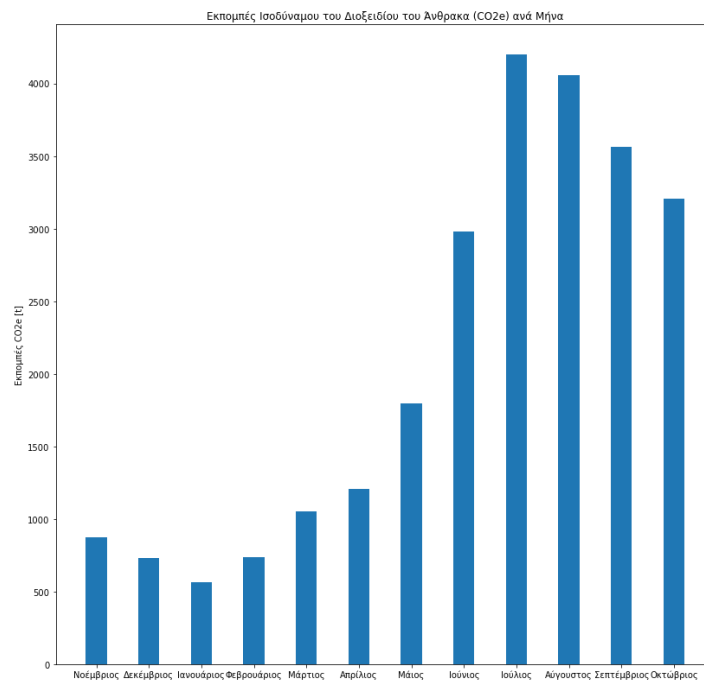
Γράφημα 14 Κατανομή εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NOx) κατά τη διάρκεια ενός έτους



Γράφημα 15 Κατανομή εκπομπών οξειδίων του θείου (SOx) κατά τη διάρκεια ενός έτους



Γράφημα 16 Κατανομή εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων (PM) κατά τη διάρκεια ενός έτους

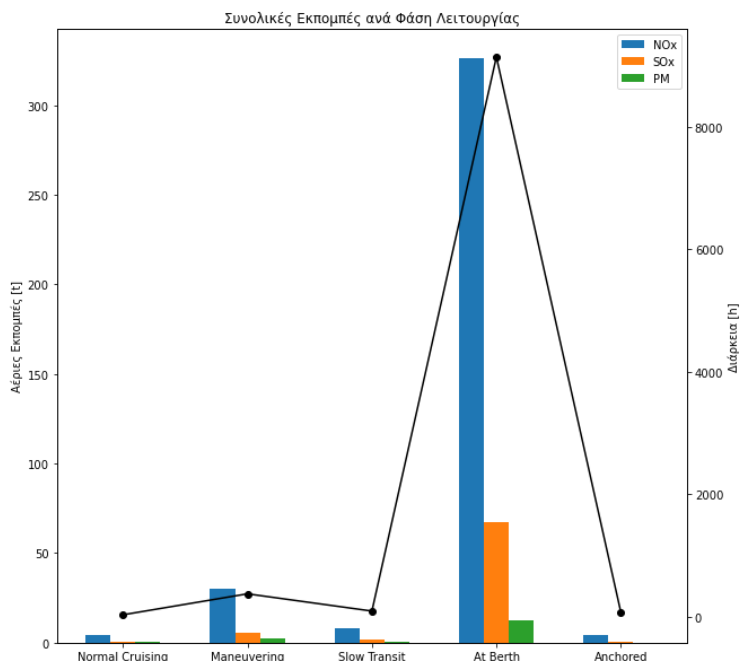


Γράφημα 17 Κατανομή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (CO_{2e}) κατά τη διάρκεια ενός έτους

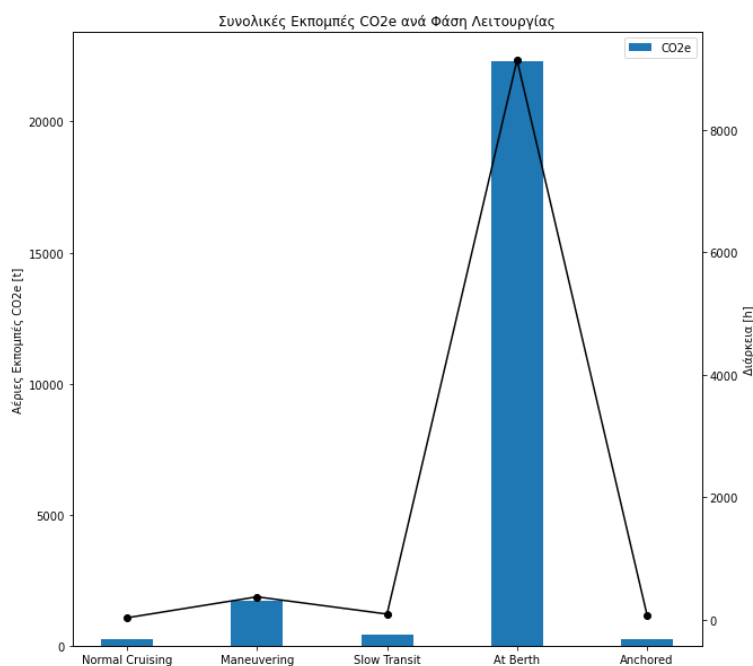
8.2.5. Σύγκριση Αποτελεσμάτων ανά Φάση Λειτουργίας

Σε αυτή την ενότητα αναλύονται οι εκπομπές ανάλογα με τη φάση λειτουργίας του πλοίου, και την διάρκεια της κάθε φάσης. Η φάση λειτουργίας προκύπτει όπως περιεγράφηκε στο Κεφάλαιο 6, και οι πιθανές τιμές της είναι οι εξής, πλεύση (normal cruising), αργή διέλευση (slow transit), ελιγμοί

(maneuvering), στο αγκυροβόλιο (anchored), και στο λιμάνι (at berth). Επειδή η ανάθεση των τιμών έγινε σύμφωνα με τα κριτήρια (απόσταση από το λιμάνι, ταχύτητα πλοίου, συντελεστής φόρτισης κύριας μηχανής) που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία, οι τελικές τιμές μπορεί να διαφέρουν από την πραγματικότητα. Στα παρακάτω γραφήματα φαίνεται ότι οι ατμοσφαιρικές εκπομπές και τα αέρια του θερμοκηπίου έχουν σημαντικά υψηλότερη τιμή κατά τη διάρκεια του ελλιμενισμού, που αυτό επίσης δικαιολογείται από την συνολική διάρκεια του ελλιμενισμού. Όπως φαίνεται, και στο Γράφημα 20, η φάση του ελλιμενισμού είναι αυτή με την συνολική μεγαλύτερη διάρκεια.

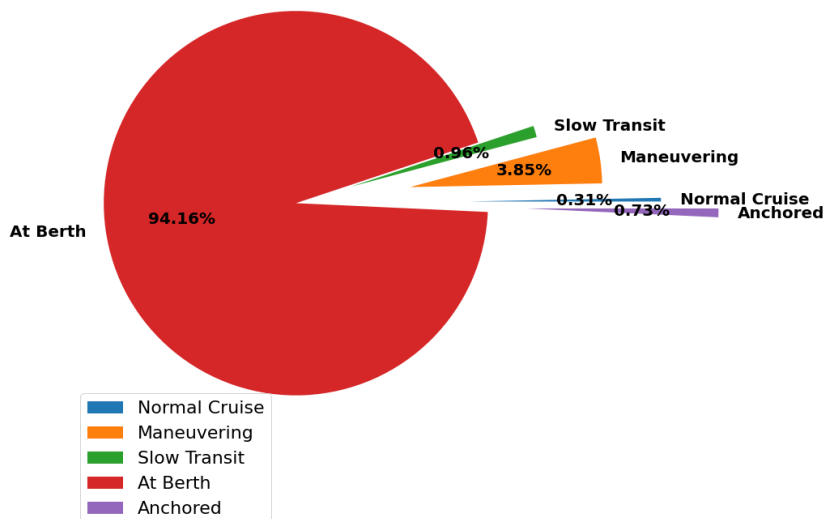


Γράφημα 18 Σύγκριση συνολικών εκπομπών ανά φάση λειτουργίας



Γράφημα 19 Σύγκριση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ανά φάση λειτουργίας

Ποσοστιαία Συνολική Διάρκεια ανά Φάση Λειτουργίας



Γράφημα 20 Συνολική διάρκεια ανά φάση λειτουργίας

Στο Γράφημα 20, αλλά και στα δύο προηγούμενα, φαίνεται για το εξεταζόμενο διάστημα πως διανέμεται ο χρόνος σε κάθε φάση λειτουργίας. Αφού το εξεταζόμενο διάστημα αφορά τις φάσεις κοντά στον ελλιμενισμό, γι' αυτό το ποσοστό του normal cruising είναι τόσο μικρό. Στην περίπτωση που εξετάζεται ολόκληρο το ταξίδι ενός πλοίου το διάστημα του normal cruising είναι αυτό που καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό.

8.2.6. Μελέτη Περίπτωσης σχετικά με τις Πλυντρίδες (Scrubbers)

Στη συγκεκριμένη ενότητα, έγινε σύγκριση μεταξύ τριών θεωρητικών προσεγγίσεων ενός επιβατηγού – οχηματαγωγού πλοίου στο λιμάνι, όπου στη μία περίπτωση θεωρήθηκε ότι έχει γίνει εγκατάσταση μονάδας scrubber. Δηλαδή εξετάζονται οι εξής περιπτώσεις:

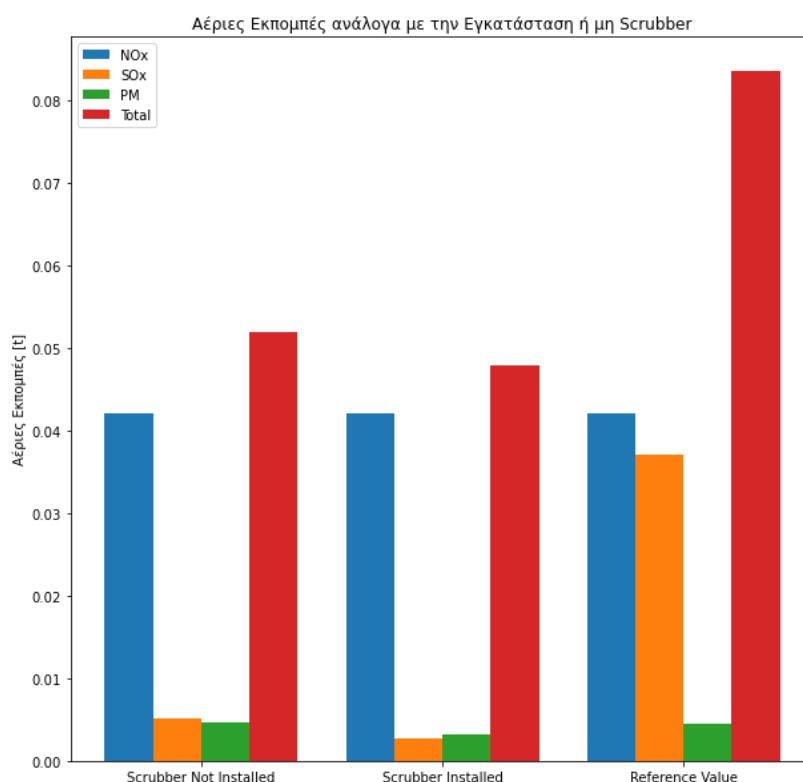
1. Το πλοίο έχει εγκατεστημένη μονάδα scrubber και χρησιμοποιεί καύσιμο υψηλότερης περιεκτικότητας σε θείο.
2. Το πλοίο χρησιμοποιεί καύσιμο σύμφωνα με τους κανονισμούς, με χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θείο.
3. Για αναφορά εξετάζεται και η περίπτωση το πλοίο να μην έχει εγκατεστημένη μονάδα scrubber και να χρησιμοποιεί καύσιμο υψηλής περιεκτικότητας σε θείο, όμοιο με την πρώτη περίπτωση.

Το παραπάνω αποτελεί ένα θεωρητικό παράδειγμα, που επιλέχθηκε να αναλυθεί στην παρούσα εργασία ώστε να φανούν οι διαφορές μεταξύ των πιθανών σεναρίων. Το πλοίο που εξετάστηκε έχει τις εξής διαστάσεις:

Πίνακας 25 Διαστάσεις υπό μελέτη πλοίων

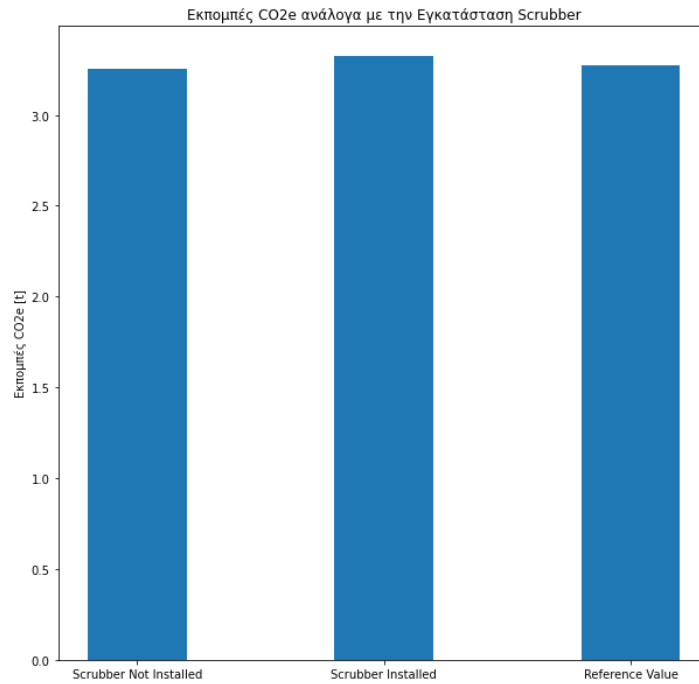
Μήκος Μεταξύ Καθέτων (L_{BP})	126.20 [m]
Πλάτος (B)	21.00 [m]
Βύθισμα (D)	5.20 [m]

Στα παρακάτω γραφήματα, φαίνεται όπως ήταν αναμενόμενο, ότι οι συνολικοί ατμοσφαιρικοί ρύποι μειώνονται με τη χρήση μονάδας scrubber, ειδικά τα οξειδία του θείου. Παρατηρείται, επίσης, ότι τα οξειδία του θείου μειώνονται αρκετά με τη χρήση καυσίμου σύμφωνα με τον κανονισμό, και ουσιαστικά οι εκπομπές σε αυτές τις δύο περιπτώσεις είναι συγκρίσιμες μεταξύ τους.



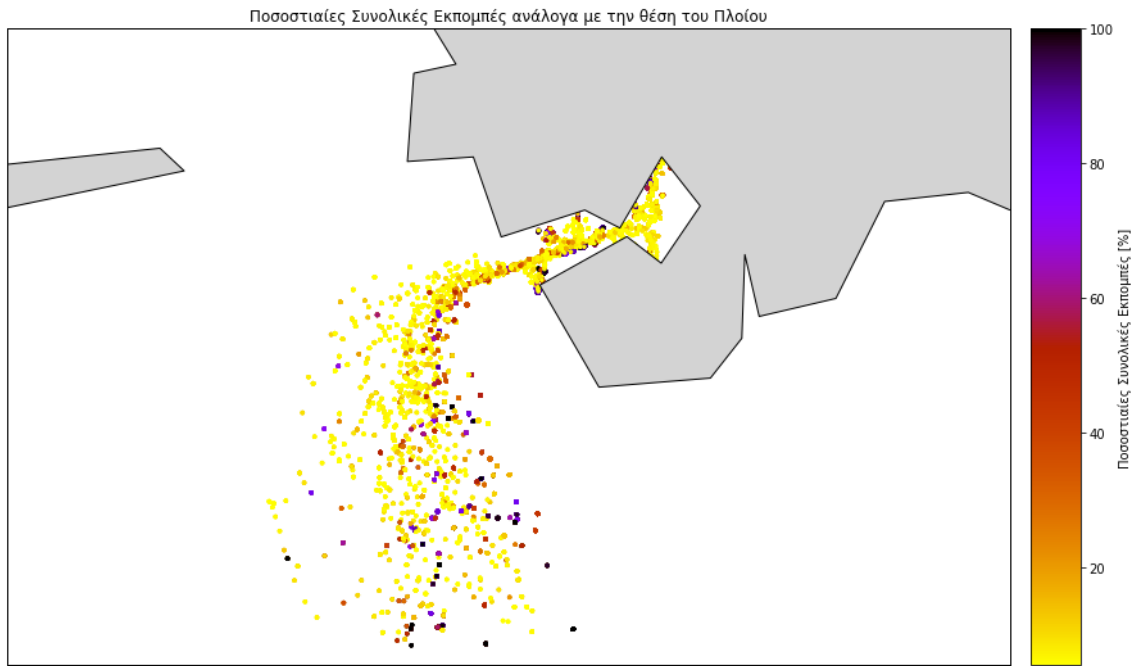
Γράφημα 21 Συνολικές αέριες εκπομπές

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζονται το ισοδύναμο διοξειδίου του άνθρακα που εκπέμπεται στις αντίστοιχες περιπτώσεις. Όπως φαίνεται δεν παρουσιάζεται κάποια διαφορά λόγω αλλαγής καυσίμου, όπως και στα NOx, αποτέλεσμα σύμφωνο με την βιβλιογραφία [54]. Αντιθέτως λόγω της μικρής αύξησης της κατανάλωσης καυσίμου, παρατηρείται πολύ μικρή αύξηση στην περίπτωση που είναι εγκαταστημένη μονάδα scrubber. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί, ότι αναλύοντας τα αέρια του θερμοκηπίου σε ανάλυση κύκλου ζωής well-to-wake, τα καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο κατά τη διάρκεια επεξεργασίας τους παράγουν αρκετές εκπομπές [40].

Γράφημα 22 Εκπομπές CO₂e

8.2.7. Γεωγραφική Απεικόνιση των Ατμοσφαιρικών Ρύπων

Στην Εικόνα 7 έγινε προσπάθεια οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων σχετικά με την θέση / διαδρομή των πλοίων. Τα αποτελέσματα που φαίνονται αφορούν τις συνολικές εκπομπές SO_x, NO_x και PM. Όπως φαίνεται υπάρχουν διασκορπισμένα σημεία όπου οι εκπομπές είναι υψηλές, τα οποία φαίνεται να αντιπροσωπεύουν συγκεκριμένες τροχιές πλοίων. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι κάποια πλοία είτε λόγω της ηλικίας, της ταχύτητας ή του καυσίμου που χρησιμοποιούν εκπέμπουν αρκετά αυξημένους ρύπους. Επίσης, παρατηρούνται αρκετά σημεία υψηλών εκπομπών εντός του λιμένα, ειδικά στις πύλες E11 και E12 των κρουαζιερόπλοιων (αναφορά Εικόνα 8). Αυτό, μπορεί να οφείλεται, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στο ότι τα κρουαζιερόπλοια παραμένουν στο λιμάνι για περισσότερη ώρα.



Εικόνα 7 Εκπομπές ανάλογα με τη θέση του πλοίου



Εικόνα 8 Γραφική απεικόνιση του λιμανιού - Πύλες λιμανιού [55]

8.2.8. Δευτερογενής Επεξεργασία Αποτελεσμάτων – Επέκταση

Σε αυτή την ενότητα επιχειρείται μια γενίκευση των αποτελεσμάτων για την δραστηριότητα των πλοίων στο σύνολο του ημερολογιακού έτους. Θεωρώντας την περίοδο μελέτης ως μια τυπική περίοδο λειτουργίας για τον αντίστοιχο μήνα, υπολογίζονται οι συνολικές εκπομπές για κάθε μήνα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν για τις συνολικές εκπομπές κατά τη διάρκεια του έτους.

Πίνακας 26 Συνολικές αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια του έτους

Οξείδια του Αζώτου (NO _x)	1627 [t]
Οξείδια του Θείου (SO _x)	331 [t]
Αιωρούμενα Σωματίδια (PM)	71 [t]
Ισοδύναμο Διοξείδιο του Άνθρακα (CO _{2e})	109120 [t]

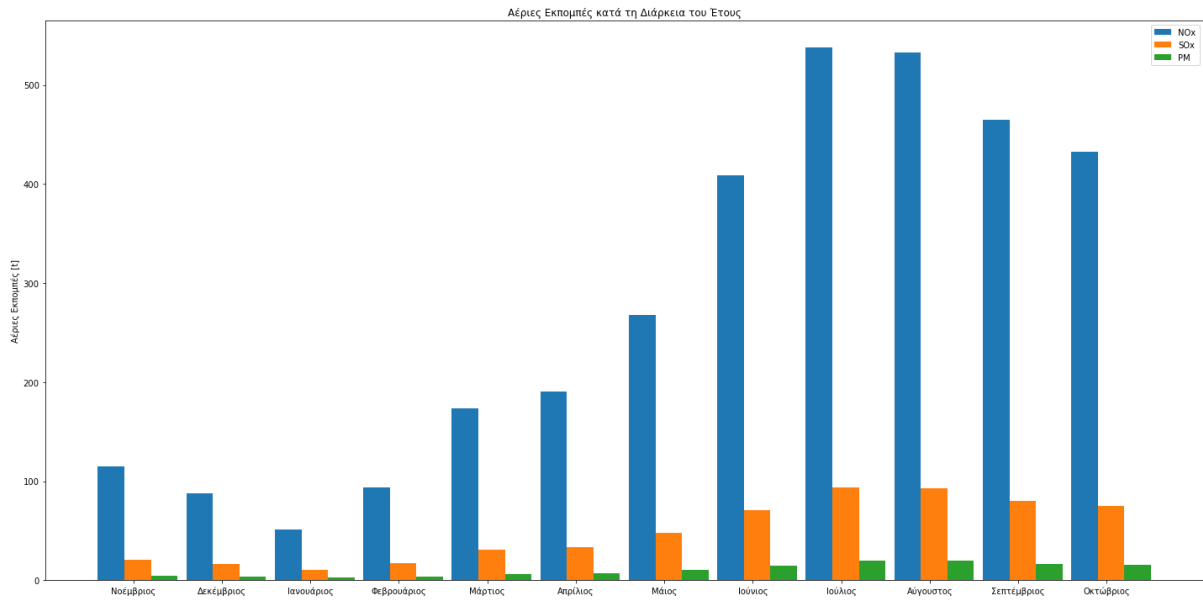
Σχετική μελέτη που έγινε για το λιμάνι του Πειραιά κατά τη διάρκεια από 1^η Οκτωβρίου 2017 έως 30^η Σεπτεμβρίου 2018, για κρουαζιερόπλοια και επιβατηγά πλοία, για τις φάσεις λειτουργίας των ελιγμών (maneuvering) και ελλιμενισμού (at berth) κατέληξε στα αποτελέσματα που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα [56]. Επίσης, στον πίνακα δίνεται και η ποσοστιαία διαφορά από τις υπολογιζόμενες τιμές της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Πίνακας 27 Συνολικές αέριες εκπομπές (1.10.2017 - 30.9.2018) [56]

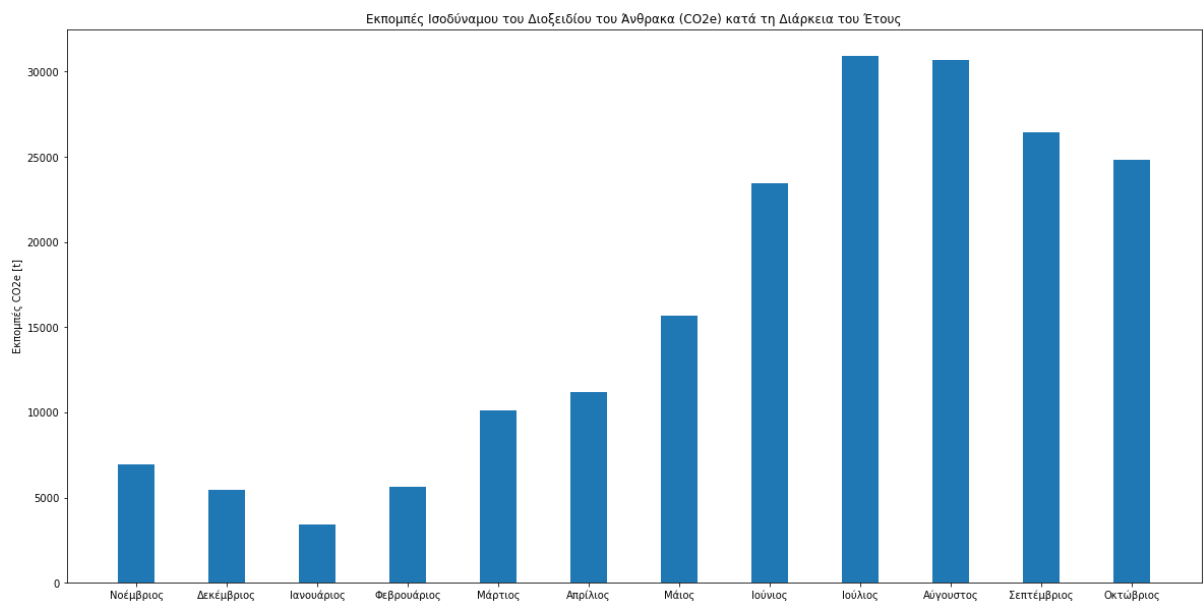
	Αποτελέσματα Έρευνας
Οξείδια του Αζώτου (NO _x)	2653 [t]
Οξείδια του Θείου (SO _x)	70 [t]
Αιωρούμενα Σωματίδια (PM)	113 [t]

Όπως φαίνεται τα αποτελέσματα για τα οξείδια του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια, από την παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάζουν μικρότερες τιμές σε σχέση με την αναφερθείσα μελέτη. Αυτό το αποτέλεσμα προκύπτει επειδή στην μελέτη αναλύθηκαν περισσότερες αφίξεις στο λιμάνι και για πλοία μικρότερης ολικής χωρητικότητας. Για τα οξείδια του θείου το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι υψηλότερο από αυτό της έρευνας και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα σημαντικό ποσοστό από τα προς μελέτη πλοία, σύμφωνα με τα δεδομένα από τις βάσεις δεδομένων, χρησιμοποιούσαν καύσιμα μη συμβατά με τη σχετική νομοθεσία για την περιεκτικότητα του θείου, και χωρίς να διαθέτουν ανάλογες τεχνολογίες μείωσης τους. Ενώ στην σχετική μελέτη θεωρήθηκε ότι τα πλοία είναι σύμφωνα με τη νομοθεσία και χρησιμοποιούν καύσιμο περιεκτικότητας σε θείο 0.1%.

Οι ολικές εκπομπές για κάθε μήνα κατά τη διάρκεια του έτους φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν δεν είναι τελείως αντιπροσωπευτικά της κίνησης στο λιμάνι, αφού εξαιρούνται από αυτά τα πλοία μικρότερης ολικής χωρητικότητας των 5000 τόνων.



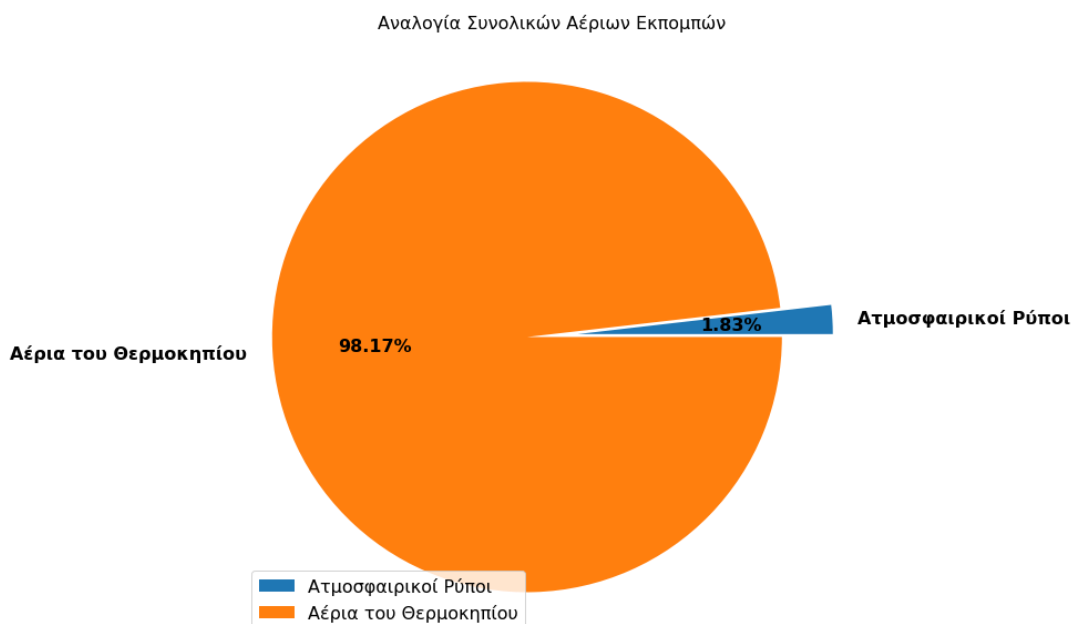
Γράφημα 23 Συνολικές αέριες εκπομπές ανά μήνα



Γράφημα 24 Συνολικές εκπομπές CO₂e ανά μήνα

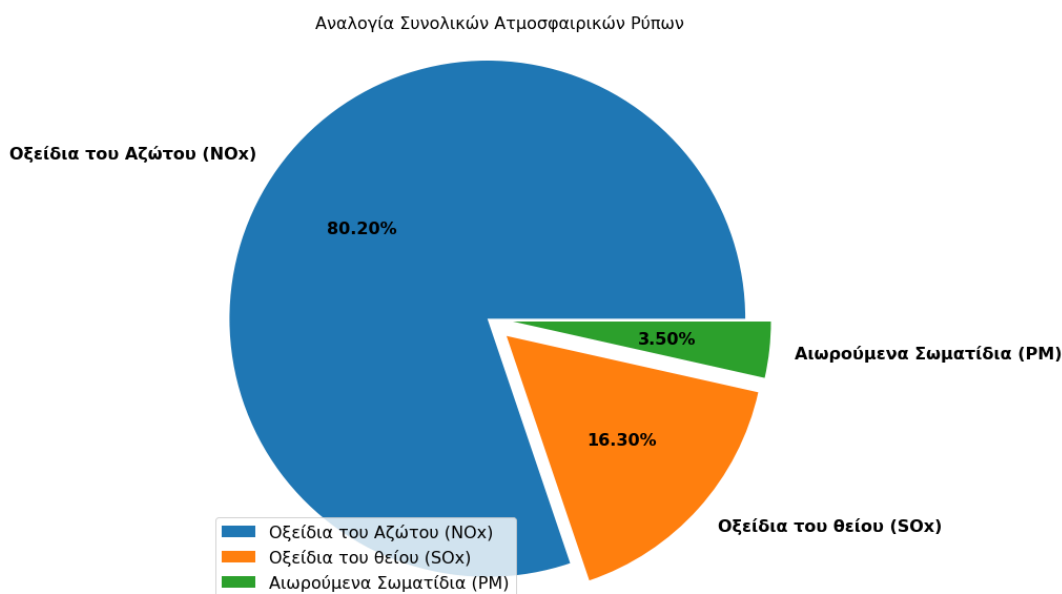
Παρατηρείται αύξηση των αέριων εκπομπών κατά τη θερινή περίοδο όπου και η κίνηση στο λιμάνι είναι αυξημένη, ενώ τον χειμώνα υπάρχει ανάλογη μείωση, αυτό το συμπέρασμα είναι σύμφωνο με την αντίστοιχη μελέτη που αναφέρθηκε και παραπάνω [32].

Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζεται η αναλογία μεταξύ των συνολικών ατμοσφαιρικών ρύπων και των αέριων του θερμοκηπίου, και η αναλογία των ατμοσφαιρικών ρύπων μεταξύ τους (SO_x, NO_x, PM).



Γράφημα 25 Αναλογία συνολικών αέριων εκπομπών

Παρατηρείται ότι το 98.17% των συνολικών εκπομπών αντιστοιχεί σε εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, ενώ οι υπόλοιποι ρύποι αποτελούν το 1.83%.



Γράφημα 26 Αναλογία κάθε ατμοσφαιρικού ρύπου

Τα παραπάνω αποτελέσματα θα μπορούσαν να συγκριθούν με τα αντίστοιχα που έχουν γίνει σε διπλωματική εργασία, στην οποία μελετήθηκαν οι ρύποι πλοίων κατά τη φάση λειτουργίας «πλεύση (normal cruising)» [1]. Σε αυτή την εργασία, τα ποσοστά των ρύπων ήταν 57.1% NO_x, 37.7% SO_x, και 5.2% PM. Συμπεραίνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις τα οξείδια του αζώτου αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό, ενώ οι διαφορές που παρατηρούνται μπορεί να οφείλονται είτε στο ότι μελετώνται διαφορετικές φάσεις λειτουργίας, ή στο ότι χρησιμοποιούνται διαφορετικά καύσιμα, χαμηλότερης περιεκτικότητας σε θείο εντός του λιμένα.

9. Επισκόπηση – Συμπεράσματα – Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε ανάπτυξη υπολογιστικού εργαλείου για τον αναλυτικό υπολογισμό των εκπομπών από τα πλοία στο λιμάνι του Πειραιά, εφαρμόζοντας την αντίστοιχη μεθοδολογία, και κάνοντας χρήση δεδομένων του αυτόματου συστήματος αναγνώρισης των πλοίων (AIS). Το υπολογιστικό εργαλείο αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Python. Η εφαρμογή του εργαλείου αφορούσε πλοία επιβατηγά – οχηματαγωγά και κρουαζιερόπλοια, ολικής χωρητικότητας άνω των 5000 τόνων. Το χρονικό διάστημα που έγινε η μελέτη ήταν από τον Νοέμβριο του 2020 έως τον Οκτώβριο του 2021, όπου για κάθε μήνα μελετήθηκε η εβδομάδα μεταξύ των ημερών 22-28. Τα στοιχεία και δεδομένα, τόσο για τα χαρακτηριστικά των πλοίων, όσο και για την κίνηση τους, αντλήθηκαν από βάσεις δεδομένων και την αντίστοιχη εφαρμογή. Επίσης, όσες παραδοχές και υποθέσεις έγιναν σε περίπτωση ελλιπών στοιχείων αλλά και σχετικά με τη χρήση του κινητήρα (φορτίο και καύσιμα), συντελεστές εκπομπών, έχουν αναφερθεί, και είναι σύμφωνες με την μεθοδολογία. Όμως, οι υποθέσεις που έχουν γίνει μπορεί να έχουν επηρεάσουν την αξιοπιστία των υπολογιζόμενων εκπομπών.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του υπολογιστικού εργαλείου παρουσιάζονται αναλυτικά. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα συνολικά αποτελέσματα, τα αποτελέσματα ανά τύπο μηχανής, ανά τύπο πλοίου, και ανά φάση λειτουργίας. Επίσης, παρουσιάστηκε ένα θεωρητικό παράδειγμα, σχετικά με την χρήση είτε καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο είτε μονάδας scrubber. Για το συγκεκριμένο παράδειγμα χρησιμοποιήθηκε ένα από τα επιβατηγά – οχηματαγωγά πλοία της μελέτης, καθώς και αντίστοιχα δεδομένα για την κίνηση του στο λιμάνι. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζουν ενδιαφέρον σχετικά με τις εκπομπές του ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα, για τα οποία θα είχε πολύ ενδιαφέρον να γινόταν ανάλυση τους κατά τον κύκλο ζωής των καυσίμων.

Τα συνολικά αποτελέσματα παρουσιάστηκαν επίσης σε γεωγραφική απεικόνιση ως προς τη θέση των πλοίων. Βασικός στόχος αυτής της οπτικοποίησης είναι να δείξει ότι εκτός από την ανάγκη υπολογισμού και ποσοτικοποίησης των αέριων εκπομπών στην περιοχή του λιμένα, θα πρέπει να ακολουθήσει και ανάλογη μελέτη για την διασπορά των εκπομπών, αφού οι εκπομπές που γίνονται εκτός των ορίων του λιμένα παραμένουν στην ατμόσφαιρα και επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα στην πόλη του Πειραιά [57]. Επίσης, οι παραπάνω μελέτες για τον υπολογισμό και την διασπορά των αέριων εκπομπών μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο ενός ολοκληρωμένου προγράμματος περιβαλλοντικής διαχείρισης του λιμένα, όπου στον υπολογισμό των αέριων εκπομπών θα προστίθενται και οι εκπομπές των εγκαταστάσεων του λιμένα.

Τελικά, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του υπολογιστικού εργαλείου, έγινε και προβολή αυτών συνολικά στο έτος. Θεωρήθηκε ότι η εβδομάδα του κάθε μήνα που μελετήθηκε είναι αντιπροσωπευτική για αυτόν τον μήνα και έτσι εξήχθησαν αποτελέσματα για ολόκληρο τον μήνα και συνολικά το έτος. Τα αποτελέσματα αυτά, όμως, δεν περιλαμβάνουν ένα μεγάλο αριθμό πλοίων που κινούνται στο λιμάνι του Πειραιά, όσα πλοία δηλαδή έχουν ολική χωρητικότητα μικρότερη των 5000 τόνων. Αυτά τα πλοία, είτε είναι πλοία της ακτοπλοΐας, όπως παραδείγματος χάρη τα πλοία των γραμμών του Αργοσαρωνικού, είτε βοηθητικά πλοία του λιμένα και του λιμενικού σώματος. Επομένως, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας θα μπορούσαν να εμπλουτιστούν συμπεριλαμβάνοντας όλα τα πλοία που κινούνται στο λιμάνι.

Τέλος, αρμόδιοι φορείς (όπως αυτοί παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3) θα μπορούσαν να αξιοποιήσουν τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας, για την χάραξη κατάλληλων πολιτικών,

ώστε να μειωθούν οι αέριες εκπομπές από τα πλοία. Σημαντικό παράδειγμα, αποτελούν οι εκπομπές των βοηθητικών μηχανών, οι οποίες αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό, και θα μπορούσαν να μειωθούν με τις ανάλογες ενέργειες, όπως η χρήση εξωτερικής παροχής ενέργειας στα πλοία όσο είναι ελλειμνισμένα. Επίσης, και τα πλοία θα πρέπει να αναβαθμιστούν όσο αφορά τις περιβαλλοντικές επιδόσεις, δηλαδή θα πρέπει να χρησιμοποιούν καύσιμα σύμφωνα με την νομοθεσία, και να χρησιμοποιούν τεχνολογίες περιορισμού των εκπομπών. Συγχρόνως είναι ανάγκη να γίνεται παρακολούθηση των εκπομπών που παράγονται από τα πλοία με τηλεμετρία και αυστηρός έλεγχος τους, με σκοπό την βελτίωση των συνθηκών του αέρα της περιοχής και κατ' επέκταση το επίπεδο διαβίωσης των πολιτών.

Το συγκεκριμένο υπολογιστικό εργαλείο θα μπορούσε να επεκταθεί ώστε να συνδέεται άμεσα με τον σύστημα αναγνώρισης πλοίων, ώστε να υπολογίζονται άμεσα οι εκπομπές, καθώς και με διάφορες βάσεις δεδομένων, ώστε τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται να είναι τα πιο επικαιροποιημένα. Επίσης, με την σύνδεση του με το σύστημα αναγνώρισης πλοίων θα μπορούσε να αναπτυχθεί και γεωγραφικά μελετώντας ολόκληρη την ακτοπλοΐα στον ελλαδικό χώρο. Παράλληλα, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και για τις υπόλοιπες κατηγορίες πλοίων, bulk carriers, tankers, containerships.

Βιβλιογραφία

- [1] Ι. Καλογερόπουλος, “Κατασκευή υπολογιστικού εργαλείου για τον αναλυτικό υπολογισμό των αερίων εκπομπών από τη λειτουργία των πλοίων,” 2020.
- [2] United Nations Conference on Trade and Development, *Review of Maritime Transport 2019*, no. October. 2019.
- [3] J. Faber *et al.*, “Fourth IMO GHG Study 2020,” *IMO*, 2020.
- [4] United Nations, “United Nations Framework Convention on Climate Change,” vol. 62220, 1992.
- [5] S. Planton *et al.*, “IPCC Annex III: Glossary,” *Clim. Chang. 2013 Phys. Sci. Basis. Contrib. Work. Gr. I to Fifth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Chang.*, pp. 1447–1466, 2013.
- [6] Ν. Ρ. Δαλέζιος, *Αγρομετεωρολογία Ανάλυση και Προσομοίωση*. 2015.
- [7] Carbon Footprint Working Group World Ports Climate Initiative, “Carbon Footprinting for Ports - Guidance Document,” 2010. [Online]. Available: http://wpci.iaphworldports.org/data/docs/carbon-footprinting/PV_DRAFT_WPCI_Carbon_Footprinting_Guidance_Doc-June-30-2010_scg.pdf.
- [8] R. Lindsey, “Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide,” *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, 2020. .
- [9] International Energy Agency, “CO2 Emissions from Fuel Combustion: Overview,” 2020.
- [10] Ø. Buhaug *et al.*, “Second IMO GHG Study 2009,” *Int. Marit. Organ.*, 2009.
- [11] A. Miola, V. Paccagnan, A. Massarutto, A. Perujo, and M. Turvani, *External costs of Transportation, Case study : maritime transport*. 2009.
- [12] Port of Los Angeles, “Inventory of Air Emissions - 2019,” 2020.
- [13] H. Ligteringen and H. Velsink, *Ports and Terminals*. 2012.
- [14] World Bank, “Module 3: Alternative Port Management Structures and Ownership Models,” in *Port Reform Toolkit*, 2007, pp. 69–130.
- [15] A. J. Baird, “Privatization trends at the world’s top-100 container ports,” *Marit. Policy Manag.*, vol. 29, no. 3, pp. 271–284, 2002, doi: 10.1080/03088830210132579.
- [16] T. Zis, “The Implications and trade-offs of near-port ship emissions reduction policies,” Imperial College London, 2015.
- [17] T. Notteboom, A. Pallis, and J. P. Rodrigue, “Terminals and Terminal Operators,” in *Port Economics, Management and Policy*, New York: Routledge, 2020.
- [18] International Maritime Organisation, “MARPOL 73/78 - International Convention for the Prevention of Pollution from Ships,” 1992.
- [19] DNV GL, “Maritime Global Sulphur Cap - Get insights on compliance options and implications for shipping,” 2019, [Online]. Available: <https://www.dnvgl.com/maritime/global-sulphur-cap/index.html>.
- [20] International Maritime Organisation, “Resolution MEPC.304(72) - Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships,” 2018, vol. 304, no. April.

- [21] Κ. Σπύρου, “Μελέτη και Εξοπλισμός Πλοίου II, Σημειώσεις Διδάσκοντος,” 2020.
- [22] International Maritime Organisation, “Resolution MEPC.203(62),” vol. 203, no. July, pp. 1–17, 2011.
- [23] International Maritime Organisation, “Guidelines For Voluntary Use Of The Ship Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI),” p. 12, 2009.
- [24] IMO, “ANNEX 7 RESOLUTION MEPC.333(76) (adopted on 17 June 2021) 2021 GUIDELINES ON THE METHOD OF CALCULATION OF THE ATTAINED ENERGY EFFICIENCY EXISTING SHIP INDEX (EEXI),” vol. 333, no. June 2021, pp. 1–10, 2021.
- [25] European Commission, “2019 Annual Report on CO2 Emissions from Maritime Transport,” p. 77, 2020.
- [26] International Maritime Organisation, “Resolution MEPC.278(70) - Amendments to MARPOL Annex VI,” vol. 278, no. October 2016, pp. 1–7, 2016.
- [27] A. Maragkogianni, S. Papaefthimiou, and C. Zopounidis, *Mitigating Shipping Emissions in European Ports*. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [28] J. P. Jalkanen, A. Brink, J. Kalli, H. Pettersson, J. Kukkonen, and T. Stipa, “A modelling system for the exhaust emissions of marine traffic and its application in the Baltic Sea area,” *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 9, no. 23, pp. 9209–9223, 2009, doi: 10.5194/acp-9-9209-2009.
- [29] Entec UK Limited, “Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community,” *Environ. Res.*, no. July, 2002.
- [30] U.S. Environmental Protection Agency, “Regulatory Impact Analysis: Control of Emissions of Air Pollution from Category 3 Marine Diesel Engines,” 2009.
- [31] C. Trozzi, “Emission estimate methodology for maritime navigation,” 2010.
- [32] E. Tzannatos, “Ship emissions and their externalities for the port of Piraeus - Greece,” *Atmos. Environ.*, vol. 44, no. 3, pp. 400–407, 2010, doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.10.024.
- [33] S. K. W. Ng *et al.*, “Policy change driven by an AIS-assisted marine emission inventory in Hong Kong and the Pearl River Delta,” *Atmos. Environ.*, vol. 76, pp. 102–112, 2013, doi: 10.1016/j.atmosenv.2012.07.070.
- [34] D. Chen *et al.*, “Estimating ship emissions based on AIS data for port of Tianjin, China,” *Atmos. Environ.*, vol. 145, pp. 10–18, 2016, doi: 10.1016/j.atmosenv.2016.08.086.
- [35] C. Trozzi and R. De Lauretis, “EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019,” *Guidebook*, no., 2019.
- [36] “Corinair Project.” <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/corinair>.
- [37] T. W. P. Smith *et al.*, “Third IMO GHG Study 2014,” *Int. Marit. Organ.*, p. 327, 2014, [Online]. Available: [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Third Greenhouse Gas Study/GHG3 Executive Summary and Report.pdf](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Third%20Greenhouse%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf).
- [38] N. Olmer, B. Comer, B. Roy, X. Mao, and D. Rutherford, “Greenhouse Gas Emissions From Global Shipping, 2013-2015.,” *Int. Counc. Clean Transp.*, no. October, pp. 1–38, 2017, [Online]. Available: https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Global-shipping-GHG-emissions-2013-2015_ICCT-Report_17102017_vF.pdf.
- [39] A. M. Kotrikla, *SHIPPING AND THE ENVIRONMENT*. Athens: Kallipos, 2015.

- [40] J. Faber, A. Kleijn, D. Jaspers, and C. E. Delft, “Comparison of CO₂ emissions of MARPOL Annex VI compliance options in 2020,” 2020, [Online]. Available: <https://www.cedelft.eu/en/publications/download/2943>.
- [41] M. M. Ramalho and T. A. Santos, “Numerical modeling of air pollutants and greenhouse gases emissions in intermodal transport chains,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 6, 2021, doi: 10.3390/jmse9060679.
- [42] D. Myhre, G. *et al.*, “Global Warming Potential Values,” *Greenh. Gas Protoc.*, vol. 2014, no. 1995, pp. 2–5, 2015.
- [43] I. Vierth and A. Merkel, “Internalization of external and infrastructure costs related to maritime transport in Sweden,” *Res. Transp. Bus. Manag.*, no. October, p. 100580, 2020, doi: 10.1016/j.rtbm.2020.100580.
- [44] “Python.” <https://www.python.org/>.
- [45] “Anaconda.” <https://www.anaconda.com/>.
- [46] “NumPy.” <https://numpy.org/>.
- [47] “Pandas.” <https://pandas.pydata.org/>.
- [48] “SciPy.” <https://scipy.org/>.
- [49] “Matplotlib.” <https://matplotlib.org/>.
- [50] “Haversine.” <https://pypi.org/project/haversine/#data>.
- [51] International Maritime Organisation, “Revised Guidelines for the Onboard Operational Use of Shipborne Automatic Identification Systems (AIS),” in *A 29/Res. 1106*, 2015, vol. 1106, no. 29.
- [52] “MarineTraffic,” [Online]. Available: <https://www.marinetraffic.com>.
- [53] “Shipping Intelligence Network.” <https://sin.clarksons.net/>.
- [54] K. Lehtoranta, T. Murtonen, N. Oyj, and H. Vesala, “Particle and Gaseous Emissions from and Aftertreatment Systems,” no. August, 2019.
- [55] “Οργανισμός Λιμένα Πειραιά.” <https://www.olp.gr/el/services-2/aktoploia>.
- [56] A. G. Progiou, E. Bakeas, E. Evangelidou, C. Kontogiorgi, and E. Lagkadinou, “Air pollutant emissions from Piraeus port : External costs and air quality levels,” *Transp. Res. Part D*, vol. 91, no. x, p. 102586, 2021, doi: 10.1016/j.trd.2020.102586.
- [57] S. D. Chatzinikolaou, S. D. Oikonomou, and N. P. Ventikos, “Health externalities of ship air pollution at port - Piraeus port case study,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 40, pp. 155–165, 2015, doi: 10.1016/j.trd.2015.08.010.

Παράρτημα

Ενδεικτική Παρουσίαση του Κώδικα

Εισαγωγή Βιβλιοθηκών

```

1 import os
2 import numpy as np
3 import pandas as pd
4 from haversine import haversine, Unit
5 from scipy.interpolate import interp1d
6 import matplotlib.pyplot as plt
7 from matplotlib import style
8 from matplotlib import colors
9 from openpyxl import load_workbook
10
11
12

```

Εικόνα 9 Εισαγωγή βιβλιοθηκών

Συντελεστής Εκπομπής NOx

```

196 #emission factor NOx [g NOx/kWh]
197 if (ship["BUILT"] <= 2000):
198     if (ship["RPM"] < 130):
199         df.at[index, "NOx_EF"] = 17
200     elif (ship["RPM"] <= 1999):
201         df.at[index, "NOx_EF"] = 45*ship["RPM"]**(-0.2)
202     else:
203         df.at[index, "NOx_EF"] = 9.8
204 elif (ship["BUILT"] <= 2011):
205     if (ship["RPM"] < 130):
206         df.at[index, "NOx_EF"] = 14.4
207     elif (ship["RPM"] <= 1999):
208         df.at[index, "NOx_EF"] = 44*ship["RPM"]**(-0.23)
209     else:
210         df.at[index, "NOx_EF"] = 7.7
211 else:
212     if (ship["RPM"] < 130):
213         df.at[index, "NOx_EF"] = 3.4
214     elif (ship["RPM"] <= 1999):
215         df.at[index, "NOx_EF"] = 9*ship["RPM"]**(-0.2)
216     else:
217         df.at[index, "NOx_EF"] = 2.0
218

```

Εικόνα 10 Συντελεστής εκπομπής NOx

Αρχικοποίηση Ισχύος Βοηθητικών Μηχανών

```

368 #aux's power
369 if (np.isnan(ship["AUX_kw"]) == True):
370     if (ship["TYPE"] == "PASS/ CAR FERRY"):
371         if (ship["DWT"] < 2000):
372             df.at[index, "aux_power"] = 105
373         elif (ship["DWT"] < 5000):
374             df.at[index, "aux_power"] = 330
375         elif (ship["DWT"] < 10000):
376             df.at[index, "aux_power"] = 670
377         elif (ship["DWT"] < 20000):
378             df.at[index, "aux_power"] = 1100
379         else:
380             df.at[index, "aux_power"] = 1950
381     elif (ship["TYPE"] == "CRUISE SHIP"):
382         if (ship["DWT"] < 10000):
383             if (df.at[index, "mode"] == 'maneuvering'):
384                 df.at[index, "aux_power"] = 580
385             else:
386                 df.at[index, "aux_power"] = 450
387         elif (ship["DWT"] < 60000):
388             if (df.at[index, "mode"] == 'maneuvering'):
389                 df.at[index, "aux_power"] = 5500
390             else:
391                 df.at[index, "aux_power"] = 3500
392         else:
393             if (df.at[index, "mode"] == 'maneuvering'):
394                 df.at[index, "aux_power"] = 14900
395             else:
396                 df.at[index, "aux_power"] = 11500
397     else:
398         df.at[index, "aux_power"] = ship["AUX_kw"]
399

```

Εικόνα 11 Ισχύς βοηθητικών μηχανών

Κατασκευή Χάρτη «Γεωγραφικής Απεικόνισης»

```

5 from mpl_toolkits.basemap import Basemap
6
7 plt.figure(figsize=(15, 15))
8
9 m = Basemap(projection='merc', llcrnrlat=37.9 ,urcrnrlat=37.96,\
10             llcrnrlon=23.56,urcrnrlon=23.68,resolution = 'h')
11 m.drawcoastlines()
12 m.drawcountries()
13 m.fillcontinents(color='lightgrey',lake_color='white')
14 m.drawmapboundary(fill_color='white')
15

```

Εικόνα 12 Κατασκευή χάρτη γεωγραφικής απεικόνισης

Κατασκευή Διαγραμμάτων «Σύγκριση Εκπομπών ανά Τύπο Μηχανής»

```

64 y2_co2e = np.array([total_co2e_me, total_co2e_aux, total_co2e_boiler])
65 y2_nox = [total_nox_me, total_nox_aux, total_nox_boiler]
66 y2_sox = [total_sox_me, total_sox_aux, total_sox_boiler]
67 y2_pm = [total_pm_me, total_pm_aux, total_pm_boiler]
68
69 x2 = ["Main Engine(s)", "Auxiliary Engine(s)", "Boiler(s)"]
70 x2_axis = np.arange(len(x2))
71
72 fig = plt.figure(figsize = (10,20))
73
74 plt.subplot(2,1,1)
75 plt.bar(x2_axis - 0.1, y2_nox, 0.2, label = "NOx")
76 plt.bar(x2_axis + 0.1, y2_sox, 0.2, label = "SOx")
77 plt.bar(x2_axis + 0.3, y2_pm, 0.2, label = "PM")
78 plt.xticks(x2_axis+0.5*0.2, x2)
79 plt.ylabel("Αέριες Εκπομπές [t]")
80 plt.title("Εκπομπές ανά Τύπο Μηχανής")
81 plt.legend()
82
83
84 plt.subplot(2,1,2)
85 plt.bar(x2_axis, y2_co2e, 0.4, align="center")
86 plt.xticks(x2_axis, x2)
87 plt.ylabel("Εκπομπές CO2e [t]")
88 plt.title("Εκπομπές CO2e ανά Τύπο Μηχανής")
89 plt.show()

```

Εικόνα 13 Κατασκευή διαγραμμάτων "Σύγκριση εκπομπών ανά τύπο μηχανής"