

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

Λειτουργικός υπολογισμός αέριων εκπομπών στον κύκλο ζωής πλοίων: Ανάπτυξη υπολογιστικού προγράμματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΗΣ ΔΑΣΚΑΛΑΚΗΣ

Επιβλέπων:

Νικόλαος Π. Βεντίκος Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Δεκέμβριος 2015

Στον πατέρα μου Νικόλαο που με ενέπνευσε στη μητέρα μου Κυριακούλα που με στήριξε στον αδερφό μου Χρήστο που με συντρόφευσε.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ολοκλήρωση των σπουδών μου στη σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου σηματοδοτεί το κλείσιμο ενός κύκλου στη μακρόχρονη τροχιά του οποίου βρέθηκα σε μια περίοδο κομβικής σημασίας για τη ζωή μου. Πρόκειται για την περίοδο που συμπυκνώνει την ενηλικίωση της κριτικής σκέψης, τη διεύρυνση των προσωπικών ορίων και την ταυτόχρονη διερεύνηση των ορίων του κόσμου.

Στο πέρασμά μου από την φοιτητική πραγματικότητα είχα την ευκαιρία να συναντηθώ με ένα πλήθος αξιόλογων ανθρώπων που προέρχονταν τόσο μέσα από την πολυτεχνική κοινότητα, όσο και από πεδία εκτός της· άνθρωποι που αποτέλεσαν για εμένα πηγή έμπνευσης αλλά και σταθερά σημεία αναφοράς. Όλους αυτούς τους ευχαριστώ βαθιά για την ανεκτίμητη παρουσία τους στη ζωή μου μέχρι και σήμερα.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες επιθυμώ να απευθύνω στον Επίκουρο Καθηγητή Νικόλαο Π. Βεντίκο ο οποίος μου εμπιστεύτηκε την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Οι συμβουλές και η καθοδήγησή του μέχρι και την τελευταία στιγμή της συγγραφής υπήρξαν πολύτιμες και καθοριστικές για το τελικό αποτέλεσμα. Είμαι ιδιαίτερα ευγνώμων, επίσης, για το γεγονός ότι δέχτηκε να παρουσιάσει την παρούσα εργασία στο πλαίσιο του συνεδρίου "Shipping in Changing Climates" που πραγματοποιήθηκε στις 24-26 Νοέμβρη 2015 στη Γλασκώβη του Ηνωμένου Βασιλείου.

Τέλος, ευχαριστώ ξεχωριστά τον Στέφανο Χατζηνικολάου, διευθυντή του κέντρου έρευνας και καινοτομίας R&D/Innovation Centre του RINA και μέλος του Εργαστηρίου Θαλασσίων Μεταφορών ΕΜΠ, ο οποίος με εισήγαγε στο ευρύ φάσμα του αντικειμένου της παρούσας μελέτης και μου προσέφερε ένα πλήθος σημαντικών ιδεών και παρατηρήσεων για την εξέλιξή της. Η συνεργασία μας και η συνεχής διαθεσιμότητά του όλους αυτούς τους μήνες συνέβαλαν σημαντικά στην ολοκλήρωση της εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

KA	ΤΑΛΟ	ΓΟΣ Π	ΙΝΑΚΩΝ	6
KA ⁻	ΤΑΛΟ	ΓΟΣ ΔΙ	ΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	9
KA ⁻	ταλο	ΓΟΣ Σ	κη ματάν μεταγραφικά τη μεταγραφική τη μεταγραφική τη μεταγραφική τη μεταγραφική τη μεταγραφική τη μεταγραφική	
KA ⁻	ταλο	ΓΟΣ ΕΙ	ΚΟΝΩΝ	
KA	ΤΑΛΟ	ΓΟΣ Σ	(ΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ	
KΔ.	ΤΑΛΟ	ΓΟΣ Σ	(ΜΒΟΛΟΝ	14
ΠΕΙ	ΡΙΛΗ	ΨH		16
1.	Εισα	ιγωγή		18
2.	Ανά	λυση Κ	ύκλου Ζωής	21
	2.1	Life C	ycle Assessment (LCA)	21
	2.2	Ανάλυ	ση κύκλου ζωής πλοίου	23
	2.3	Παραδ	δείγματα μελετών LCA στη ναυτιλία	24
7	Псо	νοαιρή	μπολογιστικού μοντέλου	27
J.	3 1	Εφαρι	υργή της μεθόδου Ανάλυσης Κύκλου Ζωής σε πλοία Bulk Carrier	27 27
	3.7	Δνάλι	ση μεταλλικής κατασκεμής	27 27
	5.2	321	Στάδιο κατασκειμές	27 28
		327	Στάδιο συντήοησης	20 32
		323	Στάδιο απόσμοσης	
	33	Ανάλυ	ση μηχανολονικής ενκατάστασης	
	5.5	331	Καύσμα	35
		3.3.2	Στάδιο κατασκευής μηχαγών	
		3.3.3	Στάδιο δοκιμών σε εργοστασιακό περιβάλλον	36
		3.3.4	Στάδιο δοκιμών σε θαλάσσιο περιβάλλον	
		3.3.5	Στάδιο λειτουργίας	
4	Псе	vogeć		40
4.		γραφη	ΟΠΟΛΟΥΙΟΙΙΚΟΟ ΠΡΟΥΡΩμματος	40
	4.1 4.2	Περιγμ	ραφή του μεριραλλονισς ΜΑΤΔΑΒ	40 11
	4.Z	περιγμ 4 ο 1	σαφή του υπολογιστικού εργαλείου	41 42
		4.2.1		42 15
		4.2.2	Δομη σπολογιστικου εργαλείου	۲4 ۱۵
		4.2.J	Γοανικό πεοιβάλλου και πλαίσια διαλόνου	
		т.2.т		
5.	Σενά	ίριο/α α	ανάλυσης	52
	5.1	Περιγρ	ραφή του υπό μελέτη πλοίου	52
	5.2	Περιγρ	ραφή της μηχανολογικής εγκατάστασης του υπό μελέτη πλοίου	52
	5.3	Σενάρ	ιο ανάλυσης μεταλλικής κατασκευής	53
	5.4	Σενάρ	ιο ανάλυσης μηχανολογικής εγκατάστασης	53
		5.4.1	Σενάριο δοκιμών σε εργοστασιακό περιβάλλον	53
		5.4.2	Σενάριο δοκιμών σε θαλάσσιο περιβάλλον	
		5.4.3	Σενάριο λειτουργίας	54
6.	Апо	τελέσμα	ατα ανάλυσης μεταλλικής κατασκευής	59
	6.1	Παραγ	/ωγń xάλυβα	59
	6.2	Копń >	κάλυβα	60
	6.3	Συγκό	λληση χάλυβα	61

	6.4	Αντικατάσταση χάλυβα	62
	6.5	Κοπή αντικατεστημένου χάλυβα	63
	6.6	Συγκόλληση αντικατεστημένου χάλυβα	64
	6.7	Απόσυρση	65
	6.8	Συνολικές εκπομπές ρύπων της μεταλλικής κατασκευής	66
7.	Апот	τελέσματα ανάλυσης μηχανολογικής εγκατάστασης	70
	7.1	Κατασκευή μηχανών	70
	7.2	Δοκιμές σε εργοστασιακό περιβάλλον	71
	7.3	Δοκιμές σε θαλάσσιο περιβάλλον	72
	7.4	Λειτουργία	73
		7.4.1 Εκπομπές αέριων ρύπων κατά τη διάρκεια κάθε ταξιδιού	73
		7.4.2 Συνολικές εκπομπές αέριων ρύπων κατά τη λειτουργία ενός έτους	98
	7.5	Συνολικές εκπομπές αέριων ρύπων της μηχανολογικής εγκατάστασης	99
	7.6	Ανάλυση των αποτελεσμάτων με βάση τους ισχύοντες κανονισμούς	104
		7.6.1 Εκπομπές CO ₂ ανά τονομίλι	104
		7.6.2 Εκπομπές NO _x ανά κιλοβατώρα	107
	7.7	Αναγωγή αποτελεσμάτων του σεναρίου λειτουργίας σε βάθος εικοσαετίας.	108
8.	Συμι	ιεράσματα	110
	8.1	Δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν κατά τη διάρκεια της μελέτης	111
9.	Προ	τάσεις για περαιτέρω ανάπτυξη της εργασίας	113
BIB	ΝΟΓ	РАФІА	114
EYI	ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 11		
ПА	РАРТ	НМА А′	118

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.	Σύγκριση των εκπομπών CO_2 των πλοίων με τις αντίστοιχες εκπομπές	σε
παγκόσμιο επίΓ	ιεδο	.18
Πίνακας 2.	Εκτίμηση από κάτω προς τα πάνω (bottom-up approach) των εκπομπ	ιών
CO2e με ανάλυ	ση ανάδρασης (climate-carbon feedback)	.18
Πίνακας 3.	Καθορισμός Περιοχών Ελέγχου Εκπομπών	.19
Πίνακας 4.	Όρια εκπομπών ΝΟχ	.19
Πίνακας 5.	Όρια εκπομπών SO _x	.19
Πίνακας 6.	Συντελεστές αέριων εκπομπών κατά την παραγωγή του χάλυβα	.29
Πίνακας 7.	Συντελεστές αέριων εκπομπών κατά την κοπή του χάλυβα	.30
Πίνακας 8.	Συντελεστές αέριων εκπομπών κατά τη συγκόλληση του χάλυβα	.32
Πίνακας 9.	Συντελεστές αέριων εκπομπών κατά την απόσυρση του πλοίου	.33
Πίνακας 10.	Συντελεστές αέριων εκπομπών κατά κατασκευή των μπχανών	.36
Πίνακας 11.	Συντελεστές αέριων εκπομπών κατά το στάδιο των δοκιμών	σε
εργοστασιακό ι	περιβάλλον	.37
Πίνακας 12.	Συντελεστές αέριων εκπομπών κατά το στάδιο των δοκιμών σε θαλάσ	σιο
περιβάλλον		.38
Πίνακας 13.	Συντελεστές αέριων εκπομπών κατά τη λειτουργία του πλοίου	.39
Πίνακας 14.	Αρχεία υπολογιστικού εργαλείου	.42
Πίνακας 15.	Κύριες διαστάσεις και χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πλοίου	.52
Πίνακας 16.	Χαρακτηριστικά μηχανολογικής εγκατάστασης του υπό μελέτη πλοίου	.53
Πίνακας 17.	Στοιχεία ταξιδιών του υπό μελέτη πλοίου	.55
Πίνακας 18.	Στοιχεία ταξιδιών του υπό μελέτη πλοίου	.56
Πίνακας 19.	Δεδομένα εισόδου λειτουργίας του υπό μελέτη πλοίου	.57
Πίνακας 20.	Αέριες εκπομπές κατά την παραγωγή του χάλυβα	.59
Πίνακας 21.	Αέριες εκπομπές κατά την κοπή του χάλυβα	.60
Πίνακας 22.	Αέριες εκπομπές κατά τη συγκόλληση του χάλυβα	.61
Πίνακας 23.	Αέριες εκπομπές κατά την αντικατάσταση του χάλυβα	.62
Πίνακας 24.	Αέριες εκπομπές κατά την κοπή του αντικατεστημένου χάλυβα	.63
Πίνακας 25.	Αέριες εκπομπές κατά τη συγκόλληση του αντικατεστημένου χάλυβα	.64
Πίνακας 26.	Αέριες εκπομπές κατά τη διαδικασία της απόσυρσης	.65
Πίνακας 27.	Συνολικές αέριες εκπομπές της μεταλλικής κατασκευής	.66
Πίνακας 28.	Αέριες εκπομπές κατά την κατασκευή των μηχανών	.70
Πίνακας 29.	Κατανάλωση καυσίμου κατά τις δοκιμές σε εργοστασιακό περιβάλλον	./
Πίνακας 30.	Αέριες εκπομπές κατά τις δοκιμές σε εργοστασιακό περιβάλλον	./
Πινακας 31.	Καταναλωση καυσιμου κατα τις δοκιμες σε θαλασσιο περιβαλλον	.72
Πίνακας 32.	Αέριες εκπομπές κατά τις δοκιμές σε θαλάσσιο περιβάλλον	.72
Πινακας 33.	Χαρακτηριστικα Ι ^ω ταξιδιου	.74
Πινακας 34.	Υπολογισμος καταναλωσης καυσιμου μηχανων κατά τη διαρκειά του	
		.74
Πίνακας 35.	Aεριες εκπομπες κατα τη διαρκεία του 1^{12} ταςιδιού	.74
Πίνακας 30.	Λαρακτηριοτικά 2 ταξιοίου	,75 700
ταξιδιού	πολογισμός κατάναλωσης κασοίμου μπλάνων κάτα τη σιαρκεία του	2 75
Πίνακας 38	Δέριςς εκπριπές κατά τη διάρκεια του 200 ταξιδιού	75
Πίνακας 30.	Χαρακτηριστικά 3 ^{ου} ταξιδιού	76
Πίνακας 40	Υπολογισμός καταγάλωσης καυσίμου μηχαγών κατά τη διάρκεια του	300
ταξιδιού		.76
Πίνακας 41	Αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια του 3°υ ταξιδιού	.76
Πίνακας 42.	Χαρακτηριστικά 4 ^{ου} ταξιδιού	.77
-		

Πίνακας 43. ταξιδιού	Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του	4 ^{ou} 77
Πίνακας 44.	Αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια του 4° ταξιδιού	
Πίνακας 45.	Χαρακτηριστικά 5° ταξιδιού	78
Πίνακας 46. ταξιδιού	Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του	5⁰ [∪] 78
Πίνακας 47.	Αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια του 5°υ ταξιδιού	78
Πίνακας 48.	Χαρακτηριστικά 6°υ ταξιδιού	79
Πίνακας 49.	Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του	6 ^{ou}
ταξιδιού		79
Πίνακας 50.	Αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια του 6 ^{ου} ταξιδιού	79
Πίνακας 51.	Χαρακτηριστικά 7 ^{ου} ταξιδιού	80
Πίνακας 52.	Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του	7 ^{ou}
ταξιδιού		80
Πίνακας 53.	Αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια του 7 ^{ου} ταξιδιού	80
Πίνακας 54.	Χαρακτηριστικά 8°υ ταξιδιού	81
Πίνακας 55.	Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του	8 ^{ou}
ταξιδιού		81
Πίνακας 56.	Αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια του 8°υ ταξιδιού	81
Πίνακας 57.	Χαρακτηριστικά 9 ^{ου} ταξιδιού	82
Πίνακας 58.	Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του	9°"
ταξιδιού		82
Πίνακας 59.	Αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια του 9°υ ταξιδιού	82
Πίνακας 60.	Χαρακτηριστικά 10 ^{ου} ταξιδιού	83
Πίνακας 61.	Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του 1	000
ταξιδιού		83
Πίνακας 62.	Αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια του 10 ^{ου} ταξιδιού	83
Πίνακας 63.	Χαρακτηριστικά 11°υ ταξιδιού	84
Πίνακας 64.	Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του 1	100
ταξιδιού		84
Πίνακας 65.	Αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια του 11 ^{ου} ταξιδιού	84
Πίνακας 66.	Χαρακτηριστικά 12° ταξιδιού	85
Πίνακας 67.	Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του Ι	200
ταξιδιου		85
Πινακάς 68.	Αεριες εκπομπες κατα τη οιαρκεια του 12° ταξιοιου	85
Πινακάς 69.		
ταξιδιού	πολογισμος καταναλωσης καυσιμου μπχανων κατα τη σιαρκεία του π	06
Π_{ivarac} 71	Λέοιος εκπομπές κατά τη διάρχεια του 1700 ταξιδιού	00 96
Πίνακας 71.	Aεριες εκπομπες κατα τη σιαρκεία του 15 ταςιστου	00
Πίνακας 72.		O7
ταξιδιού	πολογισμος κατάναλωσης κασσιμου μηλάνων κάτα τη σιαρκεία του η	87
Πίνακας 74	Δέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια του 14 ^{ου} ταξιδιού	07
Πίνακας 75	Χαρακτηριστικά 15 ^{ου} ταξιδιού	88
Πίνακας 76	Υπολογισμός καταγάλωσης καιμαίμου μηχαγών κατά τη διάρκεια του 1	
ταξιδιού		88
Πίνακας 77.	Αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια του 15°υ ταξιδιού	
Πίνακας 78	Χαρακτηριστικά 16° ταξιδιού	89
Πίνακας 79.	Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του 1	6 ⁰⁰
ταξιδιού		89
Πίνακας 80.	Αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια του 16 ^{ου} ταξιδιού	89
Πίνακας 81.	Χαρακτηριστικά 17°υ ταξιδιού	90

Πίνακας 82	. Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια	του 17ºυ
ταςιοιου	Λέοιςς εκπομπές κατά τη διάρκεια του 1700 ταξιδιού	90 00
Πίνακας 84	$X_{a,a}$ χαρακτροιστικά 18 ^ω ταξιδιού	90 01
Πίνακας 85	Υπολογισμός καταγάλωσης καμσίμου μηχαγών κατά τη διάρκεια	
ταξιδιού		
Πίνακας 86	. Αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια του 18ºº ταξιδιού	
Πίνακας 87	. Χαρακτηριστικά 19°' ταξιδιού	
Πίνακας 88	. Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια	του 19ου
ταξιδιού		92
Πίνακας 89	. Αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια του 19 ^{ου} ταξιδιού	92
Πίνακας 90	. Χαρακτηριστικά 20°υ ταξιδιού	93
Πίνακας 91	. Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια	του 20ου
ταξιδιού		93
Πίνακας 92	. Αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια του 20ºº ταξιδιού	93
Πίνακας 93	. Χαρακτηριστικά 21ºυ ταξιδιού	94
Πίνακας 94	. Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια	του 21ºυ
ταξιδιού		94
Πίνακας 95	. Αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια του 21 ^{ου} ταξιδιού	94
Πίνακας 96	. Χαρακτηριστικά ενός έτους λειτουργίας	
Πινακας 97	. Καταναλωση καυσιμου κατα τη διαρκεια ενος ετους λειτουργιας	
Πινακας 98	. Αεριες εκπομπες κατα τη διαρκεια ενος ετους Λειτουργιας	
Πινακάς 99	Συνολικές εκπομπές CO_2 της μηχανολογικής εγκαταστασής	100
Πίνακας 10	υ. Συνολικές εκπομπές NO _X της μπχανολογικής εγκαταστάστης	101
Πίνακας 10	1. Συνολικές εκπομπές SO_X της μηχανολογικής εγκαταστάστασης	101 102
Πίνακας 10	2. Συνολικές εκπομπές ΕΜ της μηχανολογικής εγκατάστασης	102 102
Πίνακας 10	4 Συνολικές εκπομπές CH της μηχανολογικής εγκατάστασης	102 103
Πίνακας 10	5 Συνολικές εκπομπές Ν ₂ Ο της μηχανολογικής εγκατάστασης	105 103
Πίνακας 10	6 Συνολικές εκπομπές ΝΔΟΟ της μηχανολογικής εγκατάστασης	103 104
Πίνακας 10	7. Χαρακτηριστικά είκοσι ετών λειτουονίας	109
Πίνακας 10	8. Κατανάλωση καυσίμου κατά τη διάρκεια είκοσι ετών λειτομονίας	
Πίνακας 10	9. Αναγωνή αέριων εκπομπών σε βάθος εικοσαετίας	
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	

καταλογός διαγραμματών

Διάγραμμα 1.	Σύγκριση εκπομπών NO _x και SO _x από τα πλοία και τις βιομηχανικές
εγκαταστασεις ξη	2ας19
Διάγραμμα 2. του πλοίου	Εκπομπές μπχανολογικής εγκατάστασης κατά την κανονική λειτουργία 24
Διάνραμμα 3.	Εκπουπές CO ₂ στη φάση της κατασκευής25
Διάνραμμα 4.	Eκπομπές CO, CH ₄ , NO _x , PM, SO ₂ , VOC, SO _x και NMVOC στη φάση της
κατασκευής	
Διάγραμμα 5.	Αέριες εκπομπές υπό μελέτη πλοίου κατά την παραγωγή του χάλυβα59
Διάγραμμα 6.	Αέριες εκπομπές υπό μελέτη πλοίου κατά την κοπή του χάλυβα60
Διάγραμμα 7.	Αέριες εκπομπές υπό μελέτη πλοίου κατά τη συγκόλληση του χάλυβα.61
Διάγραμμα 8:	Αέριες εκπομπές υπό μελέτη πλοίου κατά την αντικατάσταση του χάλυβα
Διάγραμμα 9:	Αέριες εκπομπές υπό μελέτη πλοίου κατά την κοπή του αντικατεστημένου
χάλυβα	
Διάγραμμα 10:	Αέριες εκπομπές υπό μελέτη πλοίου κατά τη συγκόλληση του
αντικατεστημένου	χάλυβα
Διάγραμμα 11:	Αέριες εκπομπές υπό μελέτη πλοίου κατά την διαδικασία της απόσυρσης 65
Διάγραμμα 12:	Αέριες εκπομπές (σε τόνους) υπό μελέτη πλοίου ανά διεργασία της
μεταλλικής κατασι	κευής69
Διάγραμμα 13:	Αέριες εκπομπές υπό μελέτη πλοίου κατά την κατασκευή των μηχανών
Διάγραμμα 14:	Αέριες εκπομπές υπό μελέτη πλοίου κατά τις δοκιμές σε εργοστασιακό
περιβάλλον	
Διάγραμμα 15:	Αέριες εκπομπές υπό μελέτη πλοίου κατά τις δοκιμές σε θαλάσσιο
περιβάλλον	
Διαγραμμα 16:	Διανυθείσα αποστάση και μέση ταχύτητα υπό μελετή πλοιού για καθε
Διαγραμμα 17:	20γκριση εκτιμωμενής και πραγματικής καταναλώσης καυσίμου κυρίας
	μελετη πλοιου
Διάγραμμα 10.	EKTOPTICS CO_2 of Kube taxiot
	Eκπομπές $10x$ σε κάθε ταξίδι 90
Διάνοαιμα 21.	Εκπομπές ΡΜ σε κάθε ταξίδι
Διάνοαιμα 27.	Εκπομπές ΓΩ σε κάθε ταξίδι 97
Λιάνοαιμα 23.	Εκπομπές CH₄ σε κάθε ταξίδι 97
Διάνοαιιια 24.	Εκπομπές Ν ₂ Ο σε κάθε ταξίδι
Διάνοαμμα 25:	Εκπομπές ΝΜVOC σε κάθε ταξίδι
Διάνοαμμα 26:	Αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια ενός έτους λειτουονίας
Διάνραμμα 27:	Γραμμή αναφοράς δείκτη ΕΕΡΙ
Διάνραμμα 28:	Εκπομπές CO ₂ ανά τονομίλι του υπό μελέτη πλοίου
Διάνραμμα 29:	Όρια εκπομπών ΝΟχ
Διάγραμμα 30:	Εκπομπές NO _x ανά κιλοβατώρα του υπό μελέτη πλοίου

καταλογός σχηματών

Σχήμα 1	1:	Τα στάδια της μεθόδου LCA	21
Σχήμα 2	2:	Τα βήματα της μεθόδου LCA	23
Σχήμα 3	3:	Δομή συστήματος ανάλυσης κύκλου ζωής πλοίου	23
Σχήμα 4	4:	Όρια συστήματος LCA μεταλλικής κατασκευής πλοίου	25
Σχήμα 5	5:	Διάκριση των υποσυστημάτων του πλοίου	27
Σχήμα θ	6:	Στάδια κύκλου ζωής μεταλλικής κατασκευής	28
Σχήμα 🛛	7:	Τα κύρια μέρη της μηχανολογικής εγκατάστασης ενός πλοίου Bulk-Carrie	r 34
Σχήμα 8	8:	Τα τέσσερα στάδια που αναλύονται κατά τη μελέτη της μηχανολογι	ικής
εγκατάσ	στασης	·	34
Σχήμα 9	9:	Δομικό διάγραμμα υπολογιστικού μοντέλου	46
Σχήμα 1	10:	Δεδομένα εισόδου υπολογιστικού μοντέλου	47
Σχήμα 1	11:	Εκπομπές CO2 ανά διεργασία της μεταλλικής κατασκευής	67
Σχήμα 1	12:	Εκπομπές CO ανά διεργασία της μεταλλικής κατασκευής	67
Σχήμα 1	13:	Εκπομπές ΝΟ _χ ανά διεργασία της μεταλλικής κατασκευής	67
Σχήμα 1	14:	Εκπομπές SO _x ανά διεργασία της μεταλλικής κατασκευής	68
Σχήμα 1	15:	Εκπομπές ΡΜ ανά διεργασία της μεταλλικής κατασκευής	68
Σχήμα 1	16:	Εκπομπές CH4 ανά διεργασία της μεταλλικής κατασκευής	68
Σχήμα 1	17:	Εκπομπές ΝΜVOC ανά διεργασία της μεταλλικής κατασκευής	69
Σχήμα 1	18:	Εκπομπές CO2 ανά στάδιο της μηχανολογικής εγκατάστασης	100
Σχήμα 1	19:	Εκπομπές ΝΟ _x ανά στάδιο της μηχανολογικής εγκατάστασης	101
Σχήμα 2	20:	Εκπομπές SO _x ανά στάδιο της μηχανολογικής εγκατάστασης	101
Σχήμα 2	21:	Εκπομπές ΡΜ ανά στάδιο της μηχανολογικής εγκατάστασης	102
Σχήμα 2	22:	Εκπομπές CO ανά στάδιο της μηχανολογικής εγκατάστασης	102
Σχήμα 2	23:	Εκπομπές CH4 ανά στάδιο της μηχανολογικής εγκατάστασης	103
Σχήμα 2	24:	Εκπομπές N2O ανά στάδιο της μηχανολογικής εγκατάστασης	103
Σχήμα 2	25:	Εκπομπές N_2O ανά στάδιο της μηχανολογικής εγκατάστασης	104

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1:	Περιβάλλον εργασίας του MATLAB (Στιγμιότυπο οθόνης)40
Εικόνα 2:	Μέρος του κώδικα του υπολογιστικού εργαλείου (Στιγμιότυπο οθόνης)41
Εικόνα 3:	Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού μοντέλου – Επιλογής υποσυστήματος για
ανάλυση (Στιγ	γμιότυπο οθόνης)48
Εικόνα 4:	Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού μοντέλου – Αριθμός εγκατεστημένων
μηχανών (Στι	γμιότυπο οθόνης)48
Εικόνα 5:	Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού μοντέλου - Τύπος κύριας μηχανής
(Στιγμιότυπο	οθόνης)48
Εικόνα 6:	Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού μοντέλου - Χαρακτηριστικά μηχανών
(Στιγμιότυπο	οθόνης)49
Εικόνα 7:	Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού μοντέλου – Διάρκεια δοκιμών (Στιγμιότυπο
οθόνης)	
Εικόνα 8:	Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού μοντέλου – Συντελεστής φόρτισης μηχανών
κατά τη διάρκ	εια των δοκιμών (Στιγμιότυπο οθόνης)49
Εικόνα 9:	Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού μοντέλου – Κύριες διαστάσεις πλοίου
(Στιγμιότυπο	οθόνης)50
Εικόνα 10:	Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού μοντέλου – Αριθμός υπό μελέτη ταξιδιών
(Στιγμιότυπο	οθόνης)50
Εικόνα 11:	Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού μοντέλου – Χαρακτηριστικά ταξιδιού
(Στιγμιότυπο	οθόνης)51
Εικόνα 12:	Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού μοντέλου – Επιλογή εκτύπωσης
νοαφημάτων	
γραφηματων	(Στιγμιότυπο οθόνης)
Εικόνα 13:	(Στιγμιότυπο οθόνης)51 Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού μοντέλου – Μήνυμα τερματισμού της

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

CH4	Μεθάνιο (Methane)		
СО	Μονοξείδιο του άνθρακα (Carbon Monoxide)		
CO ₂	Διοξείδιο του άνθρακα (Carbon Dioxide)		
CO ₂ e	Ισοδύναμο CO2 (CO2 equivalents)		
ECAs	Περιοχές ελέγχου εκπομπών (Emission Control Areas)		
EEDI	Δείκτης σχεδίασης ενεργειακής αποδοτικότητας (Energy Efficiency		
	Design Index)		
EGR	Ανακυκλοφορία καυσαερίων (Exhaust Gas Recirculation)		
GHG	Αέρια του θερμοκηπίου (Greenhouse Gases)		
HFO	Βαρύ καύσιμο (Heavy Fuel Oil)		
IMO	Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (International Maritime		
	Organization)		
ISO	Διεθνής Οργανισμός Πιστοποίησης (International Organization for		
	Standardization)		
LCA	Ανάλυση κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment)		
LCI	Καταγραφή δεδομένων κύκλου ζωής (Life Cycle Inventory)		
LCIA	Αξιολόγηση επιπτώσεων κύκλου ζωής (Life Cycle Impact		
	Assessment)		
LNG	Υγροποιημένο φυσικό αέριο (Liquefied Natural Gas)		
MARPOL	Διεθνής σύμβαση για την πρόληψη της ρύπανσης από πλοία		
	(International Convention for the Prevention of Pollution from Ships)		
MATLAB	Εργαστήριο πινάκων – Πρόγραμμα (Matrix Laboratory – Software)		
MDO	Θαλάσσιο πετρέλαιο ντίζελ (Marine Diesel Oil)		
MEPC	Επιτροπή Προστασίας Θαλασσίου Περιβάλλοντος (Marine		
	Environment Protection Committee)		
N ₂ O	Υποξείδιο του αζώτου (Nitrous Oxide)		

NECAs	Περιοχές ελέγχου των εκπομπών Αζώτου (Nitrous oxide Emission		
	Control Areas)		
NMVOC	Μη μεθανικές πτητικές οργανικές ενώσεις (Non-methane Volatile		
	Organic Compound)		
NO _X	Οξείδια του αζώτου (Nitrogen Oxides)		
NTUA	Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, ΕΜΠ (National Technical University of		
	Athens)		
PM	Μικροσωματίδια (Particulate Matter)		
SCR	Καταλυτική αναγωγή καυσαερίων (Selective Catalytic Reduction)		
SECAs	Περιοχές ελέγχου των εκπομπών θείου (Sulphur Emission Control		
	Areas)		
SEEMP	Σχέδιο διαχείρισης της ενεργειακής επίδοσης πλοίου (Ship Energy		
	Efficiency Management Plan)		
SO _x	Οξείδια του θείου (Sulphur Oxides)		

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

ARS	[tn]	Ποσότητα αντικατεστημένου χάλυβα (Amount of Replaced
		Steel)
В	[m]	Πλάτος (Breadth)
C_B		Συντελεστής γάστρας (Block Coefficient)
Δ	[tn]	Εκτόπισμα (Displacement)
D	[m]	Koíλo (Depth)
DWT	[tn]	Νεκρό βάρος πλοίου (Deadweight Tonnage)
EF		Συντελεστής ρύπου (Emission Factor)
FC	[tn]	Κατανάλωση καυσίμου (Fuel Consumption)
FS	[m]	Ισαπόσταση νομέων (Frame spacing)
l_B	[m]	Μήκος συγκόλλησης φρακτών (Bulkheads Welding Length)
l_{LS}	[m]	Μήκος συγκόλλησης διαμήκων ενισχυτικών (Longitudinal
		Stiffeners Welding Length)
l_P	[m]	Μήκος συγκόλλησης ελασμάτων (Plates Welding Length)
l_{TS}	[m]	Μήκος συγκόλλησης εγκάρσιων ενισχυτικών (Transverse
		Stiffeners Welding Length)
L _{BP}	[m]	Μήκος μεταξύ καθέτων (Length between perpendiculars)
LF		Συντελεστής φόρτισης (Loading Factor)
LS	[tn]	Βάρος άφορτου πλοίου (Lightship)
MCR	[kW]	Μέγιστη συνεχόμενη ισχύς (Maximum Continuous Rate)
n	[rpm]	Ονομαστική ταχύτητα μηχανής (Engine's Rated Speed)
n_{AE}		Αριθμός βοηθητικών μηχανών (Number of Auxiliary Engines)
n _{ME}		Αριθμός κύριων μπχανών (Number of Main Engines)
N_B		Αριθμός φρακτών (Number of Bulkheads)
P_{AE}	[kW]	Ισχύς βοηθητικών μηχανών
P_{ME}	[kW]	Ισχύς κύριων μπχανών

P _{total}	[kW]	Συνολική εγκατεστημένη ισχύς
Payload	[tn]	Ωφέλιμο φορτίο
SFC	[kg/kWh]	Ειδική κατανάλωση καυσίμου (Specific Fuel Consumption)
Т	[m]	Βύθισμα (Draft)
W_M	[tn]	Βάρος μπχανολογικής εγκατάστασης (Weight of Machinery)
W _{OT}	[tn]	Βάρος ενδιαίτησης και εξοπλισμού (Outfit Weight)
W _{ST}	[tn]	Βάρος μεταλλικής κατασκευής (Weight of Steel)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η καταγραφή και μελέτη των αέριων εκπομπών που παράγονται στον κύκλο ζωής ενός πλοίου τόσο σε επίπεδο μεταλλικής κατασκευής (παραγωγή και κοπή χάλυβα, συγκολλήσεις, επισκευές, διάλυση) όσο και σε επίπεδο μηχανολογικής εγκατάστασης (κατασκευή κύριων και βοηθητικών μηχανών, δοκιμές σε εργοστασιακό και θαλάσσιο περιβάλλον, λειτουργία). Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης μελέτης χρησιμοποιείται η μέθοδος Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment, LCA) που προσφέρει μια τεχνική προσέγγιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με το σύνολο των σταδίων ζωής ενός προϊόντος.

Στόχος της εργασίας υπήρξε η ανάπτυξη ενός υπολογιστικού προγράμματος που θα εφαρμόζει τη μέθοδο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής σε φορτηγά πλοία τύπου Bulk Carrier. Για την επίτευξη του στόχου χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής Matlab που αποτελεί ταυτόχρονα μια προγραμματιστική γλώσσα τέταρτης γενιάς.

Το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε αποτελεί ένα διαδραστικό εργαλείο που χρησιμοποιεί πλαίσια διαλόγου προκειμένου να κατευθύνει το χρήστη και να διευκολύνει την εισαγωγή των δεδομένων. Το περιβάλλον διεπαφής του προγράμματος είναι γραμμένο στην αγγλική γλώσσα, ενώ τα αποτελέσματα των υπολογισμών αποθηκεύονται σε πίνακες προκειμένου να είναι εφικτή η περαιτέρω επεξεργασία και οργάνωσή τους. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα εκτύπωσης γραφημάτων.

Ta δεδομένα εισόδου αφορούν σε βασικά χαρακτηριστικά του πλοίου, όπως οι κύριες διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά μηχανών, και σε στοιχεία λειτουργίας του. Στα αποτελέσματα συμπεριλαμβάνονται οι καταναλώσεις των κύριων και βοηθητικών μηχανών και οι ποσότητες των εκπομπών αέριων ρύπων σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής της μεταλλικής κατασκευής και της μηχανολογικής. Οι αέριες εκπομπές που αναλύονται είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), τα οξείδια του θείου (SO_x), τα οξείδια του αζώτου (NO_x), τα μικροσωματίδια (PM), το μεθάνιο (CH_4), το υποξείδιο του αζώτου (N_2O) και οι μη μεθανικές πτητικές οργανικές ενώσεις (NMVOC). Επισημαίνεται ότι το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα ανάλυσης των αέριων εκπομπών για τρία διαφορετικά είδη καυσίμων (Heavy Fuel Oil, Marine Diesel Oil, Liquefied Natural Gas).

Στο τελευταίο μέρος της εργασίας παρουσιάζονται αποτελέσματα από την εφαρμογή του υπολογιστικού προγράμματος σε περίπτωση πλοίου Bulk Carrier 206104 DWT.

Τέλος, σημειώνεται ότι η παρούσα εργασία παρουσιάστηκε, υπό τον τίτλο "Platform for Assessing Ship Emissions from a Life Cycle Perspective", στο πλαίσιο του συνεδρίου "Shipping in Changing Climates" που έλαβε χώρα στις 24-26 Νοέμβρη 2015 στη Γλασκώβη (Ηνωμένο Βασίλειο).

Λέξεις – κλειδιά: ανάλυση κύκλου ζωής, αέριες εκπομπές, ναυπήγηση, λειτουργία πλοίων, διάλυση πλοίων, πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου

ABSTRACT

The subject of this thesis is the record and assessment of emissions produced throughout the life cycle of ocean going ships. The ship is being assessed as a system that can be divided in two subsystems: the hull subsystem which corresponds to the metal structure of the ship and encloses processes such as steel production, steel cutting, steel welding, maintenance and recycling and the machinery subsystem which includes processes such as the construction of engines, shop tests, sea trials and operation. The method used is the Life Cycle Assessment (LCA) which is a technique that approaches the environmental impact of products in life cycle perspective.

The aim of the study is the development of a software which will handle the method of Life Cycle Assessment in cases of Bulk Carrier ships. The Matlab numerical computing environment, which also corresponds to a fourth-generation programming language, has been used in order to achieve this goal.

The developed software constitutes an interactive tool which uses dialog boxes in order to provide directions for the user and facilitate the data input. The user interface of the software is written in the English language, while the results are saved in matrices in order to make further assessment and organizing feasible. Finally, the ability of plotting graphs is available.

The input data consist of the main characteristics of ship, such as principal dimensions and specifications of engines, and operation data. The output results include the fuel consumptions of main and auxiliary engines and the amount of the emissions produced in each stage of hull and machinery subsystems. Carbon dioxide (CO₂) and monoxide (CO), sulphur oxides (SO_X), nitrogen oxides (NO_X), particulate matter (PM), methane (CH₄), nitrus oxide (N₂O) and non-methane volatile organic compound (NMVOC) are these emissions that are being under evaluation in this study. It is noted that the three fuels that can be assessed by the software are Heavy Fuel Oil (HFO), Marine Diesel Oil (MDO) and Liquefied Natural Gas (LNG).

In the final part of the study, the results exported from the implementation of this specific software, based on a case study of a Capesize Bulk Carrier 206104 DWT, are presented.

Finally, it is mentioned that this study was presented, under the title "Platform for Assessing Ship Emissions from a Life Cycle Perspective", at the International Conference on Shipping in Changing Climates that took place on 24-26 November 2015 in Glasgow, United Kingdom.

Keywords: life cycle assessment, emissions, ship building, ship operation, dismantling, bulk carrier

1.Εισαγωγή

Είναι γεγονός ότι τα καυσαέρια που εκπέμπονται από τα πλοία αποτελούν ένα μικρό μέρος των συνολικών αέριων εκπομπών σε παγκόσμιο επίπεδο. Ειδικότερα, στην περίπτωση των αερίων του θερμοκηπίου (Greenhouse Gases, GHG) η ναυτιλιακή δραστηριότητα συμβάλει σε ένα ποσοστό της τάξης του 3% των παγκόσμιων εκπομπών, σύμφωνα με τις τελευταίες μελέτες του Διεθνή Ναυτιλιακού Οργανισμού (International Maritime Organization, IMO). Παρ' όλα αυτά, ο τομέας της ναυτιλίας, σε διεθνές επίπεδο, καθυστέρησε σημαντικά να θεσπίσει και να υιοθετήσει κανονισμούς για τον περαιτέρω περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Σήμερα, τέτοιοι κανονισμοί, όπως είναι ο δείκτης ΕΕDI και το πλάνο SEEMP που περιλαμβάνονται στο κεφάλαιο VI της Διεθνούς Σύμβασης MARPOL που υιοθετήθηκε από τον οργανισμό IMO το 1997, βρίσκονται πλέον σε εφαρμογή και απαιτούν, μεταξύ άλλων, την ακριβή καταγραφή των ρύπων που εκπέμπονται από τα πλοία.

Πίνακας	1: Σύγκριση τω	ν εκπομπών	CO2 των	πλοίων με	τις αντίστοι	χες εκπομπές	σε παγκόσμιο
			επίπεδο	(IMO, 201-	4)		

Year	Global CO ₂	Total shipping	% of global	International shipping	% of global
2007	31,409	1,100	3.5%	885	2.8%
2008	32,204	1,135	3.5%	921	2.9%
2009	32,047	978	3.1%	855	2.7%
2010	33,612	915	2.7%	771	2.3%
2011	34,723	1,022	2.9%	850	2.4%
2012	35,640	949	2.7%	796	2.2%
Average	33,273	1,016	3.1%	846	2.6%

Επισημαίνεται ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) υπερέχουν σημαντικά των υπόλοιπων αερίων του θερμοκηπίου όσον αφορά τις παραγόμενες ποσότητες ρύπων στη ναυτιλία. Μελέτες δείχνουν ότι οι εκπομπές CO₂ που παρήχθησαν από τη ναυτιλιακή δραστηριότητα το 2012 ανέρχονται στους 796 εκατομμύρια τόνους, ενώ το 2007 οι αντίστοιχες εκπομπές ήταν 885 εκατομμύρια τόνοι.

Πίνακας 2: Εκτίμηση από κάτω προς τα πάνω (bottom-up approach) των εκπομπών CO₂e με ανάλυση ανάδρασης (climate-carbon feedback) (IMO, 2014)

	2007	2008	2009	2010	2011	2012
CH ₄	5,929	6,568	6,323	7,969	9,740	9,742
N ₂ O	12,152	12,689	11,860	10,615	11,437	10,931
CO ₂	884,900	920,900	855,100	771,400	849,500	795,700
Total	902,981	940,157	873,284	789,983	870,678	816,372

Εκτός των αερίων του θερμοκηπίου, τα πλοία εκπέμπουν ένα πλήθος ρύπων που συνιστούν απειλή όχι μόνο για το περιβάλλον αλλά και για την ανθρώπινη υγεία, ειδικότερα στις περιπτώσεις που οι περιοχές που επιβαρύνονται αποτελούν κατοικήσιμες ζώνες (Corbett, 2007). Πλέον, η ατμοσφαιρική ρύπανση συνιστά την μεγαλύτερη απειλή για την ανθρώπινη υγεία (WHO, 2014) ενώ, σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, η συμβολή της ναυτιλιακής δραστηριότητας στη διόγκωση των κινδύνων δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα (Chatzinikolaou et al., 2015c), (Tzannatos, 2010). Για τον περιορισμό των συγκεκριμένων εκπομπών, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός έχει θεσπίσει κανονισμούς που θέτουν συγκεκριμένα όρια παραγόμενων ρύπων στις αποκαλούμενες Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών (Emission Control Areas, ECA)· όρια τα οποία πρόκειται να γίνουν αυστηρότερα μέσα στα επόμενα χρόνια.

Πίνακας 3: Καθορισμός	Περιοχών Ελέγχου Εκ	κπομπών (IMO, 2014b)
-----------------------	---------------------	----------------------

	SOx ECA	NOx ECA
Baltic Sea area	X	
North Sea area	X	
North American area	Х	X
United States Caribbean	Х	X
Sea area		

Πίνακας 4: Όρια εκπομπών NO_X (IMO, 2014d)

Tier	Geographical	Ship	Total weighted cycle emission limit (g/kWh)		
	scope	construction	n = engine's rated speed (rpm)		
		date on or after	_		
			n < 130	n = 130 - 1999	n ≥ 2000
1	Global.	1 January 2000	17.0	45 * n ^{-0.2}	9.8
	Global.	1 January 2011	14.4	44 * n ^{-0.23}	7.7
	In North	1 January 2016	3.4	9 * n ^{-0.2}	2.0
	American and US	-			
	Caribbean Sea				
	ECAs.				

Πίνακας 5: Όρια εκπομπών SO_x (IMO, 2014a)

Outside ECA (global requirement)	Inside ECA
4.50% m/m prior to 1 January 2012	1.50% m/m <i>prior</i> to 1 July 2010
3.50% m/m on and after 1 January 2012	1.00% m/m on and after 1 July 2010
0.50% m/m on and after 1 January 2020*	0.10% m/m on and after 1 January 2015

Από την άλλη μεριά, οι μεταφορικές ανάγκες συνδέονται άρρηκτα με την παγκόσμια οικονομία, η ανάπτυξη της οποίας θα οδηγήσει σε αύξηση των μεταφορών και κατ' επέκταση των εκπομπών αέριων ρύπων των πλοίων.



Διάγραμμα 1: Σύγκριση εκπομπών NOX και SOX από τα πλοία και τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις ξηράς (ICCT, 2007)

Σύμφωνα με εκτιμήσεις μελετών (IMO, 2014) οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τη ναυτιλιακή δραστηριότητα αναμένεται να αυξηθούν από 50% μέχρι 250% έως το 2050 σε ευθεία αναλογία με τις οικονομικές και ενεργειακές εξελίξεις, γεγονός που οφείλεται στην ολοένα αυξανόμενη ζήτηση για μεταφορά αγαθών σε διεθνές επίπεδο.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω, η ναυτιλιακή βιομηχανία, τα τελευταία χρόνια, πραγματοποιεί συνεχείς προσπάθειες για να βελτιώσει το περιβαλλοντικό της αποτύπωμα θέτοντας σε εφαρμογή μια σειρά τεχνικών και λειτουργικών μέτρων. Αυτές οι προσπάθειες χρειάζεται να ενισχυθούν από ακριβείς μετρήσεις και καταγραφές των αέριων εκπομπών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο να συμβάλει σε αυτή την κατεύθυνση. Το υπολογιστικό πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο αυτής, προσφέρει ένα αξιόπιστο εργαλείο υπολογισμού των εκπεμπόμενων ρύπων στα διάφορα στάδια του κύκλου ζωής ενός πλοίου. Με αυτόν τον τρόπο, γίνεται εφικτό να προσεγγιστεί με σχετική ακρίβεια το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του πλοίου λαμβάνοντας υπόψη πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

2. Ανάλυση Κύκλου Ζωής

2.1 Life Cycle Assessment (LCA)

Η ολοένα αυξανόμενη ανάγκη για δραστική μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των προϊόντων, υπηρεσιών και ανθρώπινων δραστηριοτήτων έχει στρέψει το παγκόσμιο ενδιαφέρον στην προσπάθεια εξεύρεσης τεχνικών και συστημάτων με τα οποία θα καταστεί εφικτή η καταγραφή και κατ' επέκταση η βελτίωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των παραπάνω διαδικασιών. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής ενός προϊόντος είναι μια μέθοδος που μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά σε αυτή την κατεύθυνση.

Η συγκεκριμένη μέθοδος ορίζεται και περιγράφεται αναλυτικά από τον Διεθνή Οργανισμό Πιστοποίησης (International Organization for Standardization, ISO) σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040 και ISO 14044. Με βάση αυτά, η Ανάλυση Κύκλου Ζωής ορίζεται ως η διαδικασία επεξεργασίας και αξιολόγησης των εισροών, των εκροών και των δυνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός προϊόντος σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Με τον όρο «κύκλος ζωής» γίνεται αναφορά στα διαδοχικά και αλληλοσυνδεόμενα στάδια ενός προϊόντος, από την αγορά των πρώτων υλών ή τη δημιουργία από φυσικούς πόρους έως την τελική του διάθεση (ISO 14040, ISO 14044).



Σχήμα 1: Τα στάδια της μεθόδου LCA (Μαντάκος, 2012)

Η μέθοδος LCA επεξεργάζεται τα διαδοχικά στάδια της ζωής ενός προϊόντος, προκειμένου να ποσοτικοποιήσει τις περιβαλλοντικές τους συνέπειες, λαμβάνοντας υπόψη ότι κάθε ένα από αυτά τα στάδια βρίσκεται σε σχέση εξάρτησης με τα υπόλοιπα. Ο κύριος στόχος της μεθόδου είναι η δημιουργία μιας σαφούς εικόνας της αλληλεπίδρασης ενός προϊόντος ή διαδικασίας με το περιβάλλον. Με αυτόν τον τρόπο παρέχονται τα κατάλληλα κριτήρια για την επιλογή του βέλτιστου τελικού προϊόντος έναντι κάποιου άλλου. Ακόμη, η μέθοδος μπορεί να φανεί χρήσιμη στην ανάπτυξη νέων προϊόντων, διεργασιών ή δραστηριοτήτων ώστε να προκύψει μείωση των απαιτούμενων πόρων και των εκπομπών (Guinee, 2010). Όταν πρέπει να γίνει επιλογή μεταξύ δύο εναλλακτικών τότε το Life Cycle Assessment είναι εκείνο το οποίο μπορεί να βοηθήσει τους λήπτες της απόφασης καθώς συνδυάζει όλες τις περιβαλλοντικές συνέπειες που προέρχονται από τα προϊόντα, τις διαδικασίες ή τις υπηρεσίες (Μαντάκος, 2012).

Σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040 και ISO 14044 n Ανάλυση Κύκλου Ζωής μπορεί να διακριθεί σε τέσσερις επιμέρους φάσεις:

Καθορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής.
 Σε πρώτη φάση είναι απαραίτητη η πλήρης περιγραφή του συστήματος. Ο λόγος και ο στόχος της μελέτης πρέπει να αναφέρεται με σαφήνεια. Ακόμη, προσδιορίζονται τα όρια της μελέτης (ποιες εισροές και εκροές θα συμπεριληφθούν στην ανάλυση), οι απαιτήσεις ποιότητας των δεδομένων, οι μέθοδοι ανάλυσης και ερμηνείας που θα χρησιμοποιηθούν καθώς και ενδεχόμενοι περιορισμοί.

- Καταγραφή δεδομένων κύκλου ζωής (Life Cycle Inventory, LCI).

- Στο συγκεκριμένο βήμα περιλαμβάνεται η συλλογή, απογραφή και ποσοτικοποίηση των δεδομένων εισροών καθώς και η καταγραφή των εκροών. Τα παραπάνω συντελούνται σε τέσσερα διαδοχικά βήματα: κατασκευή διαγράμματος ροής, κατασκευή πλάνου διαλογής των δεδομένων, διαλογή δεδομένων, αξιολόγηση των καταγεγραμμένων αποτελεσμάτων. Η συγκεκριμένη διαδικασία είναι επαναληπτική καθώς τα δεδομένα που συλλέγονται ενδέχεται να δημιουργούν νέες απαιτήσεις ανάλυσης.
- Αξιολόγηση επιπτώσεων κύκλου ζωής (Life Cycle Impact Assessment, LCIA).
 Η φάση LCIA στοχεύει στην αξιολόγηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων χρησιμοποιώντας ως δεδομένα τα στοιχεία που καταγράφηκαν στο προηγούμενο στάδιο. Σε γενικές γραμμές, η διαδικασία περιλαμβάνει τη σύνδεση των δεδομένων απογραφής με συγκεκριμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις τις οποίες επιχειρεί να αναλύσει. Το επίπεδο των λεπτομερειών που αναλύονται, οι επιπτώσεις που αξιολογούνται καθώς και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση ορίζονται από το πρώτο στάδιο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής. Ως εκ τούτου, η διαδικασία της αξιολόγησης των επιπτώσεων μπορεί να οδηγήσει στην τροποποίηση ή αναθεώρηση των στόχων και του πεδίου εφαρμογής.
- Ερμηνεία των αποτελεσμάτων.
 - Το τελευταίο βήμα είναι αυτό κατά το οποίο τα αποτελέσματα των δύο προηγούμενων φάσεων συνδυάζονται και αξιολογούνται προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα και προτάσεις σχετικές με τη βελτίωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του προϊόντος. Το στάδιο της ερμηνείας μπορεί να περιλαμβάνει την τροποποίηση ή αναθεώρηση όλων των προηγούμενων φάσεων της μεθόδου.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται τα τέσσερα βήματα της μεθόδου Ανάλυσης Κύκλου Ζωής καθώς και το τρόπος με τον οποίο αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.



Σχήμα 2: Τα βήματα της μεθόδου LCA (ISO 14040, 1997)

2.2 Ανάλυση κύκλου ζωής πλοίου

Το πλοίο αποτελείται από πολλά και διαφορετικά υλικά και έχει ένα πλήθος λειτουργιών με αποτέλεσμα να θεωρείται ένα πολύπλοκο σύστημα στο οποίο καθίσταται δύσκολη η εφαρμογή της μεθόδου LCA. Για τους παραπάνω λόγους είναι αναγκαίος ο διαχωρισμός του πλοίου σε περαιτέρω υποσυστήματα (Ρουμελιώτη, 2013).

Τα τελευταία χρόνια το Εργαστήριο Θαλάσσιων Μεταφορών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (National Technical University of Athens, NTUA) έχει χρησιμοποιήσει την μέθοδο Ανάλυσης Κύκλου Ζωής προκειμένου να εκτιμήσει τις περιβαλλοντικές συνέπειες των θαλάσσιων μεταφορών και ναυτιλιακών δραστηριοτήτων καθώς και να εξάγει συμπεράσματα γύρω από αυτές.



Σχήμα 3: Δομή συστήματος ανάλυσης κύκλου ζωής πλοίου (Chatzinikolaou and Ventikos, 2014)

2.3 Παραδείγματα μελετών LCA στη ναυτιλία

Μέσα στο πλαίσιο αυτών των μελετών έχουν αναλυθεί επιμέρους τα υποσυστήματα της μεταλλικής κατασκευής και της μηχανολογικής εγκατάστασης ενός πλοίου ως αντικείμενα διπλωματικών εργασιών που εκπονήθηκαν.

- Στην πρώτη περίπτωση (Μαντάκος, 2012), το σύστημα που μελετάται είναι η μηχανολογική εγκατάσταση ενός πλοίου Tanker, 74296 DWT. Η συνολική ισχύς της μηχανολογικής εγκατάστασης ανέρχεται στα 14460 kW και χωρίζεται σε κύριες και βοηθητικές μηχανές. Ο κύκλος ζωής διακρίνεται σε τέσσερα επιμέρους στάδια: συγκέντρωση πρώτων υλών, κατασκευή, λειτουργία και διάλυση. Ακόμη, μελετώνται τέσσερα διαφορετικά σενάρια λειτουργίας του πλοίου:
 - 1. Σενάριο κανονικής λειτουργίας (πραγματικά στοιχεία δρομολογίων)
 - 2. Σενάριο λειτουργίας Slow Steaming
 - 3. Σενάριο λειτουργίας Cold Ironing
 - 4. Σενάριο περιορισμού ταχύτητας

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τη μελέτη του σεναρίου κανονικής λειτουργίας.



Διάγραμμα 2: Εκπομπές μηχανολογικής εγκατάστασης κατά την κανονική λειτουργία του πλοίου (Μαντάκος, 2012)

Στη δεύτερη περίπτωση (Ρουμελιώτη, 2013), το σύστημα που μελετάται είναι η μεταλλική κατασκευή του ίδιου πλοίου. Το πλοίο ταξιδεύει κυκλικά από το Novorossiysk (Russia) στην Augusta (Italy) σε απόσταση 2464 ναυτικά μίλια. Η διάρκεια ταξιδίου είναι 20.67 ημέρες, από τις οποίες 16.67 ημέρες βρίσκεται στη θάλασσα και 3 ημέρες στο λιμάνι για φόρτωση- εκφόρτωση. Η διάρκεια ζωής του πλοίου λαμβάνεται ίση με 25 χρόνια και κάνει 422 ταξίδια σε όλη τη διάρκεια ζωής του.

Τα στάδια που εξετάζονται διακρίνονται σε δύο υποενότητες: τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή και τις διεργασίες που πραγματοποιούνται για την προστασία της. Αντίστοιχα, ο κύκλος ζωής της μεταλλικής κατασκευής χωρίζεται σε τέσσερις επιμέρους φάσεις: κατασκευή, λειτουργία, συντήρηση και ανακύκλωση.



Σχήμα 4: Όρια συστήματος LCA μεταλλικής κατασκευής πλοίου (Ρουμελιώτη, 2013)

Στο παρακάτω διάγραμμα αποτυπώνονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που προέκυψαν κατά τη μελέτη των επιμέρους σταδίων της κατασκευής της μεταλλικής γάστρας. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, η διεργασίες για την παραγωγή του χάλυβα αποτελούν το στάδιο με τις περισσότερες εκπομπές CO₂, ενώ ακολουθεί η μεταφορά των υλικών και η βαφή.



Διάγραμμα 3: Εκπομπές CO2 στη φάση της κατασκευής (Ρουμελιώτη, 2013)

Αντίστοιχα, στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται οι υπόλοιπες αέριες εκπομπές που υπολογίστηκαν για τα στάδια της κατασκευής. Επισημαίνεται ότι στην παραγωγή του χάλυβα όλες οι εκπομπές είναι αρκετά υψηλές και η συγκεκριμένη διαδικασία δίνει τις περισσότερες εκπομπές σε CO, PM και CH₄ (Ρουμελιώτη, 2013).



Διάγραμμα 4: Εκπομπές CO, CH₄, NO_X, PM, SO₂, VOC, SO_X και NMVOC στη φάση της κατασκευής (Ρουμελιώτη, 2013)

•

3 Περιγραφή υπολογιστικού μοντέλου

3.1 Εφαρμογή της μεθόδου Ανάλυσης Κύκλου Ζωής σε πλοία Bulk Carrier

Στόχος της εργασίας αποτελεί η ανάπτυξη ενός υπολογιστικού προγράμματος που θα εφαρμόζει τη μέθοδο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής σε φορτηγά πλοία τύπου Bulk Carrier. Για την επίτευξη αυτού το στόχου είναι σημαντικό να επιλεγεί το κατάλληλο υπολογιστικό μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί για τις ανάγκες της εφαρμογής της μεθόδου LCA.

Το πλοίο είναι μια σύνθετη κατασκευή αποτελούμενη από διαφορετικά μέρη που συνδέονται μεταξύ τους σε υλικό και λειτουργικό επίπεδο. Για την εφαρμογή της μεθόδου LCA αποτελεί προϋπόθεση ο διαχωρισμός του πλοίου σε κατάλληλα υποσυστήματα προς ανάλυση.

Στην παρούσα εργασία το πλοίο αντιμετωπίζεται ως σύνθεση των δύο κυριότερων υποσυστημάτων από τα οποία συντίθεται: της μεταλλικής κατασκευής και της μπχανολογικής εγκατάστασης. Η επιλογή των δύο αυτών υποσυστημάτων έγινε με γνώμονα την καθοριστική συμβολή τους στις εκπομπές αέριων ρύπων κατά τη διάρκεια ζωής του πλοίου.



Σχήμα 5: Διάκριση των υποσυστημάτων του πλοίου

3.2 Ανάλυση μεταλλικής κατασκευής

Το υποσύστημα της μεταλλικής κατασκευής περιλαμβάνει όλα τα σταθερά μεταλλικά μέρη ενός πλοίου, δηλαδή το κυρίως σκάφος (γάστρα) και τις υπερκατασκευές. Στη παρούσα εργασία, η ανάλυση που πραγματοποιείται αφορά στον κύκλο ζωής των υλικών με τα οποία κατασκευάζονται τα μεταλλικά μέρη του πλοίου. Ο συγκεκριμένος κύκλος ζωής μπορεί να αναλυθεί σε τέσσερα επιμέρους στάδια:

- 1. Κατασκευή
- 2. Λειτουργία
- 3. Συντήρηση
- 4. Απόσυρση

Στο σχήμα που ακολουθεί αποτυπώνονται τα τέσσερα αυτά στάδια μαζί με τις φάσεις διεργασιών που συμπεριλαμβάνονται σε κάθε ένα από αυτά.



Σχήμα 6: Στάδια κύκλου ζωής μεταλλικής κατασκευής

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, κάθε ένα από τα τέσσερα στάδια του κύκλου ζωής της μεταλλικής κατασκευής περιλαμβάνει ένα πλήθος διεργασιών που πρέπει να αναλυθούν ως προς τις ποσότητες καυσαερίων που παράγουν σύμφωνα με τη μέθοδο LCA. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί το στάδιο της λειτουργίας του πλοίου κατά το οποίο η μεταλλική κατασκευή συνεισφέρει σχεδόν μηδενικές ποσότητες αέριων εκπομπών και ως εκ τούτου θα εξαιρεθεί από την ανάλυση της μεταλλικής κατασκευής.

Η βαφή της μεταλλικής κατασκευής δεν μελετάται στην παρούσα εργασία παρ' όλο που οι εκπομπές κατά τη συγκεκριμένη διεργασία δεν είναι αμελητέες. Ειδικότερα, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι εκπομπές μη μεθανικών οργανικών πτητικών ενώσεων εμφανίζονται αυξημένες στις εργασίες βαφής (Chatzinikolaou and Ventikos, 2014b), (Celebi and Vardar, 2008).

Στη συνέχεια, γίνεται εκτενής αναφορά και ανάλυση στα τέσσερα στάδια καθώς και στις επιμέρους λειτουργίες τους.

3.2.1 Στάδιο κατασκευής

Το συγκεκριμένο στάδιο περιλαμβάνει το σύνολο των διεργασιών που αφορούν στην κατασκευή των μεταλλικών μερών του πλοίου. Οι διεργασίες που μελετώνται είναι η παραγωγή του χάλυβα καθώς και η κοπή και συγκόλλησή του. Ως υλικό κατασκευής θεωρείται ο κοινός ναυπηγικός χάλυβας με τον οποίο ναυπηγείται η συντριπτική πλειονότητα των φορτηγών πλοίων του παγκόσμιου στόλου και των συμβατικών ναυπηγικών κατασκευών.

Παραγωγή χάλυβα

Στη συγκεκριμένη διεργασία υπολογίζεται η ποσότητα χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του πλοίου. Η ποσότητα αυτή ισοδυναμεί με το βάρος της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου (Weight of steel, W_{ST}), για τον υπολογισμό του οποίου χρησιμοποιούνται οι παρακάτω εμπειρικοί τύποι που προέρχονται από στατιστική ανάλυση πάνω σε πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου (d' Almeida, 2009):

$$W_{M} = 2.41 \cdot P_{MCR}^{0,62}$$
(1)
$$W_{OT} = 6.1790 \cdot (L_{BP} \cdot B \cdot D)^{0,48}$$
(2)
$$W_{ST} = LS - W_{M} - W_{OT}$$
(3)

Για τον υπολογισμό των εκπομπών αέριων ρύπων κατά τη συγκεκριμένη διαδικασία, η ποσότητα του χάλυβα πολλαπλασιάζεται με τους παρακάτω συντελεστές εκπομπών (Eco-Indicator 99).

Είδος ρύπου	Μονάδα	Συντελεστής
CO ₂	gr/kg	996.00
CO	gr/kg	31.83
CH_4	mg/kg	163.17
NOx	gr/kg	5.84
PM (all)	mg/kg	928.96
SO _x	gr/kg	5.58372
VOC	mg/kg	12.57
NMVOC	mg/kg	10.84

Πίνακας 6: Συντελεστές αέριων εκπομπών κατά την παραγωγή του χάλυβα (Eco-Indicator 99)

- Копń

Ο χάλυβας παραλαμβάνεται από τα ναυπηγεία σε φύλλα τυποποιημένων διαστάσεων και ως εκ τούτου είναι απαραίτητη η κοπή του σε κομμάτια κατάλληλου μεγέθους και σχήματος σύμφωνα με τα αντίστοιχα κατασκευαστικά σχέδια του πλοίου (Shell Expansion Plan). Η ενέργεια που καταναλώνεται κατά την κοπή ισοδυναμεί, σε μονάδες kilowatt ανά τόνο DWT, με 3.026 kW/tn (Kameyama et al., 2004).

Οι ποσότητες αέριων εκπομπών που παράγονται κατά την κοπή του χάλυβα υπολογίζονται με βάση την παρακάτω εξίσωση (Kameyama et al., 2004):

$$EM_i = E_C \cdot DWT \cdot EF_i \qquad (4)$$

όπου $E_{C} = 3.026 \, kW/tn$ n ενέργεια που απαιτείται

*EF*_i συντελεστής εκπομπής που λαμβάνεται από τον πίνακα 7.

Είδος ρύπου	Μονάδα	Συντελεστής
CO ₂	gr/kwh	319.16
CO	mg/kwh	303.68
CH_4	mg/kwh	20.82
NO _x	mg/kwh	128.89
PM (all)	mg/kwh	212.74
SOx	gr/kwh	2.23
NMVOC	mg/kwh	101.97

Πίνακας 7: Συντελεστές αέριων εκπομπών κατά την κοπή του χάλυβα (Eco-Indicator 99)

· Συγκόλληση

Η συγκόλληση αποτελεί μια από τις σημαντικότερες διεργασίες κατά την κατασκευή του μεταλλικού μέρους του πλοίου αφού συνδέει μεταξύ τους τα κομμάτια χάλυβα που προηγουμένως έχουν κοπεί. Για τη συγκεκριμένη διαδικασία λαμβάνονται υπόψη τα εξής δύο μεγέθη: η ενέργεια που καταναλώνεται ανά μέτρο συγκόλλησης και το μήκος της συγκόλλησης.

Ενέργεια συγκόλλησης

Η ενέργεια που απαιτείται για συγκόλληση μήκους ενός μέτρου θεωρείται ίση με 0.538 kW/m σύμφωνα με στοιχεία μελέτης πάνω σε πλοία Tanker (Kameyama et al., 2004). Ελλείψει άλλων στοιχείων θα θεωρηθεί ότι ίδιο ποσότητα ενέργειας απαιτείται για την πραγματοποίηση συγκολλήσεων σε πλοία τύπου Bulk Carrier όπως αυτά που μελετώνται στην παρούσα εργασία.

Μήκος συγκόλλησης

Για τον υπολογισμό του μήκους συγκόλλησης λαμβάνονται υπόψη τα τέσσερα κύρια δομικά στοιχεία της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου: διαμήκη ενισχυτικά, εγκάρσια ενισχυτικά, φρακτές και ελάσματα. Οι υπολογισμοί των αντίστοιχων μηκών γίνονται με βάση τις σχέσεις που ακολουθούν (Ρουμελιώτη, 2013).

Διαμήκη ενισχυτικά

Τα διαμήκη ενισχυτικά εφαρμόζονται σε τρία επίπεδα: κατάστρωμα (Deck), πυθμένας (Bottom) και διπύθμενο (Double bottom). Η σχέση που υπολογίζει το μήκος συγκόλλησής τους είναι η εξής:

$$l_{LS} = 3 \cdot \frac{B}{FS} \cdot L_{BP} + 2 \cdot \frac{D}{FS} \cdot L_{BP} + 2 \cdot \frac{D - 2[m]}{FS} \cdot L_{BP}$$
(5)

Ο τελευταίος όρος της σχέσης αφορά στο διπύθμενο γι' αυτό αφαιρούνται δύο μέτρα από το κοίλο του πλοίου. Αντίστοιχα, το πλάτος πολλαπλασιάζεται επί 3 γιατί αναφερόμαστε στο κατάστρωμα, το διπύθμενο και τον πυθμένα.

Εγκάρσια ενισχυτικά

Το μήκος συγκόλλησης των εγκάρσιων ενισχυτικών υπολογίζεται από τον τύπο

$$l_{TS} = \frac{L_{BP}}{FS} \cdot (3 \cdot B + 2 \cdot D) + 2 \cdot \frac{L_{BP}}{FS} \cdot (D - 2[m]) \tag{6}$$

όπου ο τελευταίος όρος αναφέρεται, επίσης, στο διπύθμενο.

<u>Φρακτές</u>

Το μήκος συγκόλλησης των φρακτών υπολογίζεται από τον τύπο

$$l_B = N_B \cdot [3 \cdot B + 2 \cdot D + 2 \cdot (D - 2[m])] + N_B \cdot \frac{B}{FS} \cdot D$$
(7)

όπου ο τελευταίος όρος αφορά στις συγκολλήσεις των φρακτών με τα διαμήκη ενισχυτικά.

Ελάσματα

Το μήκος συγκόλλησης των ελασμάτων δίνεται από τον τύπο (8)

$$l_{P} = \frac{L_{BP}}{6[m]} \cdot \left[3 \cdot B + 2 \cdot D + 2 \cdot (D - 2[m]] + 3 \cdot \frac{B}{2[m]} \cdot L_{BP} + 2 \cdot \left(\frac{D}{2[m]} + \frac{D - 2[m]}{2[m]}\right) \cdot L_{BP}$$

και αφορά σε ελάσματα μεγέθους 6×2 m. Τα τρία μέρη της παραπάνω σχέσης αναφέρονται στη συγκόλληση ελασμάτων κατά το διάμηκες, εγκάρσιο και κατακόρυφο επίπεδο αντίστοιχα.

Το συνολικό μήκος συγκόλλησης προκύπτει από το άθροισμα των παραπάνω επιμέρους μηκών

$$L_{W'} = l_{LS} + l_{TS} + l_B + l_P \tag{9}$$

το οποίο προσαυξάνεται κατά 15% για να συμπεριλάβει λοιπές συγκολλήσεις που δεν μπορούν να υπολογιστούν:

$$L_W = 1.15 \cdot L_{W'}$$
 (10)

Οι ποσότητες αέριων εκπομπών που παράγονται κατά τη διάρκεια των συγκολλήσεων υπολογίζονται με βάση την παρακάτω εξίσωση (Kameyama et al., 2004):

$$EM_i = L_W \cdot E_W \cdot EF_i \tag{11}$$

όπου $E_W = 0.538 \, kW/m$ η ενέργεια που απαιτείται

*EF*_i συντελεστής εκπομπής που λαμβάνεται από τον πίνακα 8

Είδος ρύπου	Μονάδα	Συντελεστής
CO ₂	gr/kwh	319.16
CO	mg/kwh	303.68
CH_4	mg/kwh	20.82
NO _x	mg/kwh	128.89
PM (all)	mg/kwh	212.74
SOx	gr/kwh	2.23
NMVOC	mg/kwh	101.97

Πίνακας 8: Συντελεστές	αέριων	εκπομπών	κατά	τη συγκόλλησ	ση του	χάλυβα
	(Ecc	o-Indicator	99)			

3.2.2 Στάδιο συντήρησης

Στο στάδιο της συντήρησης περιλαμβάνονται οι απαραίτητες διεργασίες που αφορούν στη συντήρηση της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου. Τέτοιες διεργασίες είναι η αντικατάσταση του χάλυβα, η κοπή του αντικατεστημένου χάλυβα και η συγκόλλησή του.

- Αντικατάσταση χάλυβα

Η αντικατάσταση του χάλυβα σε μέρη του πλοίου είναι μια διαδικασία που πραγματοποιείται, ως επί το πλείστον, μετά το δέκατο χρόνο λειτουργίας του. Στις περισσότερες των περιπτώσεων η συγκεκριμένη διεργασία λαμβάνει χώρα κάθε πέντε έτη κατά τη διάρκεια δεξαμενισμού (Drydocking) του πλοίου για ανάγκες εργασιών συντήρησης και επισκευής.

Έχει υπάρξει ένα πλήθος μελετών που εστιάζουν στην ποσότητα του χάλυβα που αντικαθίσταται κατά τη διάρκεια ζωής ενός πλοίου. Σύμφωνα με μία από αυτές, ένα ποσοστό 10% του συνολικού βάρους της μεταλλικής κατασκευής αντικαθίσταται σε βάθος εικοσαετίας (Jiven et al., 2004).

Στην παρούσα εργασία, ο τρόπος υπολογισμού της ποσότητας αντικατεστημένου xάλυβα γίνεται με βάση τον παρακάτω τύπο που περιγράφεται σε μελέτη που έγινε σχετικά με το συγκεκριμένο ζήτημα (Turan et al., 2006):

$$ARS = LS \cdot 0.0306 \cdot e^{0.2772 \cdot (age \ of \ ship)}$$
(12)

Κοπή αντικατεστημένου χάλυβα

Για τη συγκεκριμένη διεργασία γίνεται η εξής παραδοχή: η ενέργεια που απαιτείται για την κοπή του αντικατεστημένου χάλυβα λαμβάνεται ίση με το 10% της ενέργειας κοπής του χάλυβα κατά το στάδιο της κατασκευής (Ρουμελιώτη, 2013).

Συγκόλληση αντικατεστημένου χάλυβα

Για τη συγκεκριμένη διεργασία γίνεται η εξής παραδοχή: το μήκος συγκόλλησης του αντικατεστημένου χάλυβα λαμβάνεται ίσο με το 10% του μήκους συγκόλλησης του χάλυβα κατά το στάδιο της κατασκευής (Ρουμελιώτη, 2013).

3.2.3 Στάδιο απόσυρσης

Η απόσυρση του πλοίου, και κατ' επέκταση η διαδικασία διάλυσης και ανακύκλωσής του, αποτελεί το τελευταίο, αλλά εξίσου σημαντικό με τα προηγούμενα, στάδιο στον κύκλο ζωής ενός πλοίου σε επίπεδο περιβαλλοντικών συνεπειών. Γίνεται, άλλωστε, κατανοητό ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ζωής ενός πλοίου μπορούν να μειωθούν δραστικά αν ληφθεί υπόψη και μελετηθεί κατάλληλα η διαδικασία ανακύκλωσης των υλικών από τα οποία αποτελείται. Παρ' όλα αυτά, η ανακύκλωση ενός πλοίου είναι ένα πεδίο που ελάχιστα έχει αναλυθεί και ως εκ τούτου οι σχετικές πληροφορίες είναι λίγες.

Επισημαίνεται ότι περίπου το 70% των δραστηριοτήτων ανακύκλωσης πλοίων λαμβάνει χώρα σε παραλίες της Ινδίας, του Μπαγκλαντές ή του Πακιστάν κάτω από ακατάλληλες εργασιακές και περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι διαδικασίες ανακύκλωσης που ακολουθούνται περιορίζονται στο τεμαχισμό του πλοίου σε μεταλλικά μέρη που μετέπειτα προωθούνται, ως επί το πλείστον, σε βιομηχανικές μονάδες της Ασίας. Το συγκεκριμένο καθεστώς καθιστά πολύπλοκη την όποια απόπειρα συλλογής και ανάλυσης πληροφοριών σχετικών με τις περιβαλλοντικές συνέπειες που δημιουργούνται κατά τη φάση της διάλυσης των πλοίων.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας οι εκπομπές καυσαερίων κατά το στάδιο της ανακύκλωσης προκύπτουν από το γινόμενο του βάρους μεταλλικής κατασκευής με συγκεκριμένους συντελεστές που προέρχονται από διαλυτήριο της Ινδίας (Tilwankar, 2012) για τα CO₂, NO_X και CH₄, ενώ για όλα τα υπόλοιπα χρησιμοποιούνται κοινοί συντελεστές με το στάδιο της παραγωγής.

Είδος ρύπου	Μονάδα	Συντελεστής
CO ₂	gr/kg	338.64
CO	gr/kg	31.83
CH_4	mg/kg	86.48
NOx	gr/kg	4.38
PM (all)	mg/kg	928.96
SO _X	gr/kg	5.58372
VOC	mg/kg	12.57
NMVOC	mg/kg	10.84

Πίνακας 9: Συντελεστές αέριων εκπομπών κατά την απόσυρση του πλοίου (Tilwankar, 2012)

3.3 Ανάλυση μηχανολογικής εγκατάστασης

Η μπχανολογική εγκατάσταση ενός πλοίου περιλαμβάνει το σύνολο των μπχανικών μερών που καθιστούν εφικτή τη λειτουργία του πλοίου. Τέτοια μέρη αποτελούν η κύρια μπχανή που είναι υπεύθυνη για την πρόωση του πλοίου, οι βοηθητικές μπχανές που παράγουν την απαιτούμενη πλεκτρική ενέργεια και άλλες μικρότερες μπχανές που ποικίλουν ανάλογα με τον τύπο του πλοίου.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η μηχανολογική εγκατάσταση ενός πλοίου Bulk Carrier. Ως εκ τούτου, η ανάλυση αφορά στην κύρια και στις βοηθητικές μηχανές που έχουν συντριπτική συμβολή στις ποσότητες των αέριων εκπομπών κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του πλοίου.



Σχήμα 7: Τα κύρια μέρη της μηχανολογικής εγκατάστασης ενός πλοίου Bulk-Carrier

Σε περιπτώσεις πλοίων μεταφοράς χύδην φορτίου ο συνηθέστερος τύπος κύριας μπχανής που εγκαθίσταται είναι αυτός της αργόστροφης (Low Speed) δίχρονης ντιζελομηχανής ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις εγκαθίστανται μεσόστροφες (Medium Speed) τετράχρονες μηχανές ντίζελ.

Όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί, το υποσύστημα της μηχανολογικής εγκατάστασης διακρίνεται σε τέσσερα επιμέρους στάδια, κάθε ένα από τα οποία μελετάται ξεχωριστά με βάση τη μέθοδο LCA.



Σχήμα 8: Τα τέσσερα στάδια που αναλύονται κατά τη μελέτη της μηχανολογικής εγκατάστασης

Τέλος, σημαντικό ρόλο στη διαδικασία μελέτης της μηχανολογικής εγκατάστασης έχει η ανάλυση των καυσίμων που χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία των μηχανών του πλοίου.

3.3.1 Καύσιμα

Στους περισσότερους μεγάλους ναυτικούς κινητήρες υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν καύσιμα μεταβλητής σύνθεσης και ποιότητας (Πανταζής, 2010). Μέχρι και σήμερα, το κυριότερο καύσιμο που χρησιμοποιείται από τις κύριες μηχανές των πλοίων είναι το βαρύ καύσιμο (Heavy Fuel Oil, HFO). Στην ουσία, ο όρος "βαρύ καύσιμο" περιλαμβάνει ένα φάσμα καυσίμων διαφορετικών ποιοτήτων. Ένα άλλο καύσιμο που χρησιμοποιείται ευρέως στη ναυτιλία είναι το Marine Diesel Oil (MDO) το οποίο αποτελεί ελαφρότερο απόσταγμα από το βαρύ καύσιμο, έχει ωστόσο μεγαλύτερο κόστος. Κριτήριο της επιλογής καυσίμου είναι κυρίως το κόστος, όμως πρέπει να λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως η απόδοση και η αντοχή του κινητήρα, το κόστος συντήρησης, η πιθανότητα πρόωρων βλαβών, καθώς και η εκπομπή ρύπων (Χατζηλάου και Μοστράτος, 1978).

Τα τελευταία χρόνια, η ανάγκη για δραστική μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων και καταπολέμηση των κλιματικών αλλαγών που προκαλούνται από τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (*Greenhouse Gasses, GHG*) οδήγησε στην αναζήτηση τρόπων με τους οποίους κάτι τέτοιο θα μπορούσε να επιτευχθεί. Ένας από τους τρόπους που αποδεικνύεται ότι μπορεί να συμβάλει καθοριστικά προς αυτή την κατεύθυνση είναι η χρήση, από τις ναυτικές μηχανές, υγροποιημένου φυσικού αερίου (*Liquefied natural gas, LNG*). Επισημαίνεται ότι η βασική σύσταση του LNG είναι το μεθάνιο (CH₄) το οποίο βρίσκεται σε συγκέντρωση έως και 95%. Σύμφωνα με τεχνική έκθεση της Mitsubishi, η χρήση του LNG ως κύριου καύσιμου από τις μηχανές ενός πλοίου μπορεί να μειώσει έως και 98% τις εκπομπές οξειδίων του θείου (SO_x), έως 78% τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) καθώς και μέχρι 25% τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) (Unseki, 2013).

Οι συγκεκριμένες μειώσεις ευθυγραμμίζονται με τους σύγχρονους κανονισμούς όπως είναι n εφαρμογή, από τον IMO, των μηχανισμών EEDI (Energy Efficiency Design Index) και SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan) για τη μείωση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, οι κανονισμοί που περιγράφονται στα Tier II και Tier III για τον περιορισμό των εκπομπών οξειδίων του αζώτου καθώς και τα όρια που τίθενται για τις εκπομπές οξειδίων του θείου εντός ή εκτός περιοχών ελέγχου εκπομπών ρύπων (Emission Control Areas, ECAs) στο πλαίσιο της MARPOL VI.

Στην παρούσα εργασία, η ανάλυση των εκπομπών γίνεται σε τρία διακριτά επίπεδα που αφορούν στη χρήση τριών διαφορετικών καυσίμων: Heavy Fuel Oil, Marine Diesel Oil και Liquefied Natural Gas.

3.3.2 Στάδιο κατασκευής μηχανών

Πρόκειται για το πρώτο στάδιο μελέτης του υποσυστήματος της μηχανολογικής εγκατάστασης το οποίο περιλαμβάνει την κατασκευή όλων των μηχανικών μερών του πλοίου (κύρια μηχανή και βοηθητικές μηχανές). Ο υπολογισμός των αέριων εκπομπών που παράγονται σε αυτό το στάδιο γίνεται συναρτήσει της συνολικής ισχύος των μηχανών που είναι εγκατεστημένες στο πλοίο. Η ισχύς πολλαπλασιάζεται με

συντελεστές ρύπων (Emission Factors) που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων Eco-Indicator 99.

Ο υπολογισμός της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος σε kW γίνεται με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$P_{total} = n_{ME} \cdot P_{ME} + n_{AE} \cdot P_{AE}$$
(13)

Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται οι τιμές των συντελεστών ρύπων που πολλαπλασιάζονται με τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ για να αποδώσουν την ποσότητα αέριων εκπομπών.

Είδος ρύπου	Μονάδα	Συντελεστής
CO ₂	kg/kW	84.827
CO	kg/kW	0.183
CH_4	kg/kW	0.104
NO _x	kg/kW	0.270
SO _X	kg/kW	0.029
PM (all)	kg/kW	0.557
NMVOC	kg/kW	0.018

Πίνακας 10: Συντελεστές αέριων εκπομπών κατά κατασκευή των μηχανών (Ecolndicator 99)

3.3.3 Στάδιο δοκιμών σε εργοστασιακό περιβάλλον (Shop Tests)

Η διαδικασία των δοκιμών σε εργοστασιακό περιβάλλον προηγείται της εγκατάστασης των μπχανών στο πλοίο. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, που γίνονται στη βάση συγκεκριμένων κανονισμών των νπογνωμόνων, εκπέμπονται ποσότητες καυσαερίων προς την ατμόσφαιρα. Η σχέση που περιγράφει την κατανάλωση καυσίμου των μπχανών στο στάδιο των δοκιμών περιλαμβάνεται σε μελέτη του Εργαστηρίου Θαλάσσιων Μεταφορών του ΕΜΠ (Chatzinikolaou and Ventikos, 2015a).

Η σχέση αυτή δίνεται συναρτήσει της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (Specific Fuel Consumption) των μηχανών. Η μέση τιμή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου των κύριων μηχανών είναι 0.170 kg/kWh για τις αργόστροφες μηχανές και 0.190 kg/kWh για τις μεσόστροφες, ενώ η αντίστοιχη μέση τιμή για τις βοηθητικές μηχανές λαμβάνεται ίση με 0.200 kg/kWh (Andersen, 2012).

$$m_{FC}^{shop tests} = \sum_{i}^{n} SFC_{i} \cdot n_{i} \cdot MCR_{i} \cdot t_{i} \qquad (14)$$

όπου SFC_i η ειδική κατανάλωση καυσίμου κάθε μηχανής και

n_i ο αριθμός των μηχανών *i*

*t*_i οι ώρες δοκιμής της εκάστοτε μηχανής
Η ποσότητα καυσίμου που υπολογίζεται ότι καταναλώνεται κατά τη διάρκεια των δοκιμών πολλαπλασιάζεται με συντελεστές εκπομπών, ανάλογους με το καύσιμο που χρησιμοποιείται, που περιλαμβάνονται σε πρόσφατη μελέτη του ΙΜΟ (ΙΜΟ, 2014).

Είδος ρύπου	HFO (g/g fuel)	MDO (g/g fuel)	LNG (g/g fuel)
CO ₂	3.114	3.206	2.750
NOx	0.07846	0.07375	0.00783
SOx	0.04908	0.00264	0.00002
PM	0.00699	0.00102	0.00018
CO	0.00277	0.00277	0.00783
CH ₄	0.00006	0.00006	0.05120
N_2O	0.00016	0.00015	0.00011
NMVOC	0.00308	0.00308	0.00301

Πίνακας 11: Συντελεστές αέριων εκπομπών κατά το στάδιο των δοκιμών σε εργοστασιακό περιβάλλον (ΙΜΟ, 2014)

3.3.4 Στάδιο δοκιμών σε θαλάσσιο περιβάλλον (Sea Trials)

Αμέσως μετά την εγκατάσταση των μηχανών στο πλοίο πραγματοποιείται μια διαδικασία ελέγχου και δοκιμής τους σε θαλάσσιο περιβάλλον. Η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα πριν την παράδοση του πλοίου και συμπεριλαμβάνεται στο στάδιο της ναυπήγησης.

Ακολουθεί η σχέση με βάση την οποία υπολογίζεται η κατανάλωση καυσίμου των μηχανών κατά τη διάρκεια των δοκιμών τους σε θαλάσσιο περιβάλλον (Chatzinikolaou and Ventikos, 2015a):

$$m_{FC}^{trials} = \sum_{i=1}^{m} [LF_i \cdot MCR_i \cdot SFC_i \cdot T]$$
(15)

όπου *LF_i* ο συντελεστής φόρτισης κάθε μηχανής,

SFC_i η ειδική κατανάλωση καυσίμου κάθε μηχανής και

Τ οι ώρες δοκιμών

Σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς των νηογνωμόνων, για τη φόρτιση των μηχανών κατά τη διάρκεια των δοκιμών σε θαλάσσιο περιβάλλον ισχύουν τα εξής (IACS, 2015):

Για τις κύριες μηχανές πρόωσης:

- 1. Δοκιμή στο 100% του MCR για τουλάχιστον 60 λεπτά.
- 2. Δοκιμή στο 110% του MCR για τουλάχιστον 15 λεπτά.
- Δοκιμή στο 90%, 75%, 50% και 25% για χρονική διάρκεια που συμφωνείται με τον κατασκευαστή.

Για τις βοηθητικές μηχανές:

- 1. Δοκιμή στο 100% του MCR για τουλάχιστον 60 λεπτά.
- Δοκιμή στο 110% του MCR για τουλάχιστον 15 λεπτά και εφόσον σε αυτό το διάστημα έχει σταθεροποιηθεί η λειτουργία τους.
- Δοκιμή στο 75%, 50% και 25% για χρονική διάρκεια που συμφωνείται με τον κατασκευαστή.

Η ποσότητα καυσίμου που υπολογίζεται πολλαπλασιάζεται με συντελεστές εκπομπών, ανάλογους του καυσίμου που χρησιμοποιείται, που περιλαμβάνονται σε πρόσφατη μελέτη του ΙΜΟ (ΙΜΟ, 2014).

Είδος ρύπου	HFO (g/g fuel)	MDO (g/g fuel)	LNG (g/g fuel)
CO ₂	3.114	3.206	2.750
NO _X	0.07846	0.07375	0.00783
SOx	0.04908	0.00264	0.00002
PM	0.00699	0.00102	0.00018
CO	0.00277	0.00277	0.00783
CH ₄	0.00006	0.00006	0.05120
N_2O	0.00016	0.00015	0.00011
NMVOC	0.00308	0.00308	0.00301

Πίνακας 12: Συντελεστές αέριων εκπομπών κατά το στάδιο των δοκιμών σε θαλάσσιο περιβάλλον (IMO, 2014)

3.3.5 Στάδιο λειτουργίας

Η λειτουργία των μηχανών αποτελεί το σημαντικότερο στάδιο της μηχανολογικής εγκατάστασης μιας και ευθύνεται για το μεγαλύτερο μέρος εκπομπών αέριων ρύπων στη διάρκεια ζωής ενός πλοίου.

Η λειτουργία ενός πλοίου μπορεί να περιλαμβάνει ένα πλήθος επιμέρους λειτουργιών όπως είναι κανονική λειτουργία, οι κινήσεις ελιγμών, η παραμονή στο λιμάνι, η φόρτωση και εκφόρτωση και η ρυμούλκηση. Υπό αυτή την έννοια, ο συνολικός χρόνος, σε ημέρες, ενός κυκλικού ταξιδιού μπορεί να υπολογιστεί ως άθροισμα των χρόνων των επιμέρους λειτουργιών (Chatzinikolaou and Ventikos, 2015a):

$$t_{trip} = \sum_{j=1}^{\nu} t_j \qquad (16)$$

Αντίστοιχα, υπολογίζεται ο αριθμός των ταξιδιών που πραγματοποιούνται σε ένα έτος:

$$N_{trips/year} = \frac{365 - t_{off}}{t_{trip}}$$
(17)

όπου t_{off} ο χρόνος όπου του πλοίο μένει ανενεργό (λόγω επισκευών κ.λπ.)

Η σχέση που δίνει τη συνολική κατανάλωση καυσίμου του πλοίου, σε τόνους, κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού περιγράφεται ακόλουθα (Chatzinikolaou and Ventikos, 2015a):

$$FC_{TOTAL} = \sum_{j=1}^{n} FC(t_j) = 24 \cdot 10^{-6} \cdot \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} [LF_{i,j} \cdot MCR_i \cdot SFC_{i,j} \cdot t_j]$$
(18)

όπου *i* η μηχανή *i* του πλοίου

m ο αριθμός των εγκατεστημένων μηχανών

j n εκάστοτε λειτουργία του πλοίου

n ο συνολικός αριθμός λειτουργιών

 LF_{ij} ο συντελεστής φόρτισης της μηχανής i κατά τη λειτουργία j

MCR_i n μέγιστη συνεχής ισχύς της μηχανής *i*

 SFC_{ij}
 η ειδική κατανάλωση καυσίμου της μηχανής iκατά τ
η λειτουργία j

Για τις κύριες μπχανές, ο συντελεστής φόρτισης υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο (NCFRP, 2010):

$$LF = \left(\frac{Actual Speed}{Maximum Speed}\right)^3$$
(19)

Η ποσότητα καυσίμου που υπολογίζεται πολλαπλασιάζεται με συντελεστές εκπομπών, ανάλογους του καυσίμου που χρησιμοποιείται, που περιλαμβάνονται σε πρόσφατη μελέτη του ΙΜΟ (ΙΜΟ, 2014).

Πίνακας 13: Συντελεστέα	; αέριων εκπομπώ	ον κατά τη λειτουργία	του πλοίου (IMO, 2014)
--------------------------------	------------------	-----------------------	------------------------

Είδος ρύπου	HFO (g/g fuel)	MDO (g/g fuel)	LNG (g/g fuel)
CO ₂	3.114	3.206	2.750
NOx	0.07846	0.07375	0.00783
SOx	0.04908	0.00264	0.00002
PM	0.00699	0.00102	0.00018
CO	0.00277	0.00277	0.00783
CH ₄	0.00006	0.00006	0.05120
N_2O	0.00016	0.00015	0.00011
NMVOC	0.00308	0.00308	0.00301

4 Περιγραφή υπολογιστικού προγράμματος

4.1 Περιγραφή του περιβάλλοντος MATLAB

Για την εκπλήρωση του σκοπού της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής MATLAB. Το MATLAB, πέρα από υπολογιστικό περιβάλλον, αποτελεί ταυτόχρονα μια προγραμματιστική γλώσσα τέταρτης γενιάς. Αυτό σημαίνει ότι είναι ένα φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον προγραμματισμού αφού διαθέτει εργαλεία που αποκρύπτουν πολλές τεχνικές λεπτομέρειες από την υλοποίηση των προγραμμάτων, σε αντίθεση με άλλες γλώσσες που απευθύνονται κυρίως σε προγραμματιστές.

Το MATLAB αποτελεί μια υπολογιστική πλατφόρμα κατάλληλη για την μοντελοποίηση και την επίλυση σύνθετων μαθηματικών –και όχι μόνο- προβλημάτων. Το όνομά του προέρχεται από τις λέξεις MATrix LABoratory (Εργαστήριο πινάκων) που υποδηλώνουν το γεγονός ότι η λειτουργία του βασίζεται εξ ολοκλήρου στη χρήση πινάκων, στοιχεία των οποίων μπορεί να είναι πραγματικοί ή μιγαδικοί αριθμοί.



Εικόνα 1: Περιβάλλον εργασίας του ΜΑΤLAB (Στιγμιότυπο οθόνης)

Ανάμεσα στο πλήθος σημαντικών εργαλείων που προσφέρει το MATLAB συμπεριλαμβάνεται n υψηλού επιπέδου και ταχύτητας προγραμματιστική γλώσσα με δομές δεδομένων, συναρτήσεις, εντολές ελέγχου ροής, εντολές εισόδου και εξόδου και στοιχεία από αντικειμενοστραφείς γλώσσες προγραμματισμού, n βιβλιοθήκη μαθηματικών συναρτήσεων, n εύκολη διαχείριση πινάκων, οι δυνατότητες διάδρασης με το χρήστη καθώς και τα γραφικά συστατικά και n δυνατότητα γραφικής απεικόνισης (*Plotting*) συναρτήσεων και δεδομένων.

Οι εντολές που γράφονται αποτελούν τον πηγαίο κώδικα (Source Code) του παραγόμενου προγράμματος και αποθηκεύονται σε αρχεία m-files (με κατάληξη .m) που είναι τυπικά αρχεία text κωδικοποίησης ASCII. Υπάρχουν δύο κατηγορίες τέτοιων αρχείων: τα αρχεία κειμένου (Script Files) που εκτελούνται απευθείας από το παράθυρο εντολών (Command Window) πληκτρολογώντας το όνομα του αρχείου χωρίς την προέκταση .m και τα αρχεία συναρτήσεων (Function Files) που στην ουσία λειτουργούν όπως οι υπορουτίνες άλλων

προγραμματιστικών γλωσσών (Visual Basic, Fortran κ.λπ.), καλούνται από το κύριο πρόγραμμα ενώ οι μεταβλπτές τους είναι τοπικά ορισμένες και όχι καθολικής εμβέλειας όπως στα αρχεία κειμένου. Από τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό το υπολογιστικό εργαλείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο μέσα από το περιβάλλον του ΜΑΤLAB.

Τέλος, τα παραγόμενα γραφήματα ή διαγράμματα αποθηκεύονται σε αρχεία με προέκταση .fig και αποτελούν τυπικά δυαδικά (*Binary*) αρχεία εικόνας (*Figure Files*). Ωστόσο, το MATLAB προσφέρει τη δυνατότητα αποθήκευσης αυτών των αρχείων σε άλλες μορφές (.jpg, .bmp, .tif κ.λπ.) ώστε η προβολή τους να είναι εφικτή μέσα από οποιοδήποτε πρόγραμμα προβολής εικόνων.

4.2 Περιγραφή του υπολογιστικού εργαλείου

Το υπολογιστικό πρόγραμμα που γράφτηκε σε περιβάλλον MATLAB αποτελείται από 11 αρχεία m-files (1 αρχείο του κύριου προγράμματος και 10 αρχεία συναρτήσεων) και περίπου 1.800 γραμμές κώδικα.

Πρόκειται για ένα διαδραστικό πρόγραμμα αφού για να εκτελέσει συγκεκριμένους υπολογισμούς ζπτάει και δέχεται δεδομένα εισόδου από τον χρήστη. Όλα τα πλαίσια διαλόγου και επικοινωνίας είναι γραμμένα στην αγγλική γλώσσα, ενώ για κάθε τιμή μεγέθους που ζητείται διευκρινίζονται οι μονάδες στις οποίες πρέπει αυτό να εισαχθεί.

Το αρχείο του κύριου προγράμματος αποτελεί τον κύριο κορμό του υπολογιστικού εργαλείου μέσα από τον οποίο, ανάλογα με τις εισόδους του χρήστη, καλούνται τα αρχεία συναρτήσεων προκειμένου να εκτελέσουν συγκεκριμένες εντολές. Οι εντολές αυτές αφορούν είτε σε υπολογισμούς και εφαρμογή μαθηματικών σχέσεων είτε σε κατασκευή γραφημάτων και διαγραμμάτων με βάση τα αποτελέσματα.



Εικόνα 2: Μέρος του κώδικα του υπολογιστικού εργαλείου (Στιγμιότυπο οθόνης)

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα ονόματα και τα είδη των 11 αρχείων που αποτελούν το πρόγραμμα:

Όνομα αρχείου	Τύπος αρχείου	Λειτουργία
main_program.m	Script file	Είσοδος - Έξοδος
engines.m	Function file	Είσοδος δεδομένων
dimensions.m	Function file	Είσοδος - Υπολογισμοί
engines_construction.m	Function file	Υπολογισμοί
trials.m	Function file	Είσοδος - Υπολογισμοί
operation_single_trip.m	Function file	Είσοδος - Υπολογισμοί
operation_many_trips.m	Function file	Είσοδος - Υπολογισμοί
machinery.m	Function file	Υπολογισμοί
hull.m	Function file	Υπολογισμοί
graphs_machinery	Function file	Εκτύπωση γραφημάτων
graphs_hull	Function file	Εκτύπωση γραφημάτων

Πίνακας 14: Αρχεία υπολογιστικού εργαλείου

4.2.1 Περιγραφή αρχείων

Ακολουθεί n περιγραφή των βασικών λειτουργιών κάθε αρχείου του υπολογιστικού εργαλείου.

main_program.m

Πρόκειται για τον βασικό κορμό του υπολογιστικού προγράμματος και χωρίζει το πρόγραμμα σε τρεις διακριτές λειτουργίες με βάση το υποσύστημα του πλοίου που ζητείται να αναλυθεί.

Αρχικά, εμφανίζεται στην οθόνη ένα πλαίσιο διαλόγου (Dialog Box) στο οποίο ο χρήστης καλείται να επιλέξει σε ποιο μέρος του πλοίου θα εφαρμοστεί η μέθοδος. Υπάρχουν τρεις επιλογές: "Hull", "Machinery" και "Both". Η τρίτη επιλογή αφορά στην παράλληλη ανάλυση της μεταλλικής κατασκευής και της μηχανολογικής εγκατάστασης. Ανάλογα με την εντολή, το πρόγραμμα καλεί ένα ή περισσότερα από τα αρχεία συναρτήσεων που ζητούν τα αντίστοιχα δεδομένα και εκτελούν τους υπολογισμούς.

Για την περίπτωση της μηχανολογικής εγκατάστασης, δίνεται στο χρήστη η δυνατότητα να επιλέξει αν επιθυμεί να μελετηθούν ένα ή περισσότερα ταξίδια του πλοίου ("Single trip / Many trips"). Στην περίπτωση που ο χρήστης επιλέξει τη μελέτη ενός μοναδικού ταξιδιού, καλείτε το αρχείο συνάρτησης "operation_single_trip.m" για να διεξάγει τους αντίστοιχους υπολογισμούς. Σε αντίθετη περίπτωση, καλείται το αρχείο "operation_many_trips.m". Για τη μελέτη της μεταλλικής κατασκευής, το πρόγραμμα καλεί το αρχείο συνάρτησης "hull_stages.m" προκειμένου να εκτελέσει τους υπολογισμούς.

Αφού ολοκληρωθεί το υπολογιστικό κομμάτι, το πρόγραμμα ρωτάει τον χρήστη, με τη βοήθεια πλαισίου διαλόγου, αν επιθυμεί να εκτυπώσει κάποια γραφήματα ή διαγράμματα με βάση τα αποτελέσματα. Αν η απόκριση είναι θετική, καλούνται τα αντίστοιχα αρχεία συναρτήσεων που εκτυπώνουν γραφήματα. Σε αντίθετη περίπτωση η λειτουργία του προγράμματος τερματίζεται με την εμφάνιση του μηνύματος «Operation Completed, Thank you».

engines.m

Το συγκεκριμένο αρχείο καλείται ανεξάρτητα από τον τομέα ανάλυσης που έχει επιλέξει ο χρήστης.

Στην οθόνη εμφανίζονται διαδοχικά τρία πλαίσια διαλόγου. Στο πρώτο, ο χρήστης καλείται να συμπληρώσει τον αριθμό των κύριων και βοηθητικών μηχανών που είναι εγκατεστημένες στο πλοίο. Στο δεύτερο, επιλέγεται ο τύπος της κύριας μηχανής μεταξύ δύο επιλογών: αργόστροφη (Low speed) και μεσόστροφη (Medium speed). Με βάση τη συγκεκριμένη επιλογή καθορίζεται η τιμή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου της κύριας μηχανής. Στην περίπτωση των αργόστροφων μηχανών η τιμή είναι 170 g/kWh, ενώ στην περίπτωση των μεσόστροφων μηχανών η τιμή ίση με 190 g/kWh (Andersen, 2012). Με βάση την ίδια πηγή, οι ειδικές καταναλώσεις των βοηθητικών μηχανών λαμβάνονται 200 g/kWh. Στο τρίτο πλαίσιο διαλόγου, ο χρήστης καλείται να συμπληρώσει την μέγιστη ισχύ (Maximum Continuous Rate, MCR [kW]) των κύριων και των βοηθητικών μηχανών.

Σε τελευταία στάδιο, τα δεδομένα αποθηκεύονται σε πίνακα και επιστρέφουν στο πρόγραμμα προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητοι υπολογισμοί.

dimensions.m

Το αρχείο καλείται στην περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί να πραγματοποιήσει ανάλυση είτε στη μεταλλική κατασκευή του πλοίου (εντολή "Hull") είτε στη μεταλλική κατασκευή και τη μηχανολογική εγκατάσταση παράλληλα (εντολή "Both").

Αρχικά, εμφανίζεται στο χρήστη ένα πλαίσιο διαλόγου στο οποίο ζητείται η συμπλήρωση των εξής στοιχείων του πλοίου:

- Μήκος μεταξύ καθέτων (Length between perpendiculars, L_{BP} [m])
- Πλάτος (Breadth, B [m])
- Koíλo (Depth, D [m])
- Βύθισμα (Draft, Τ [m])
- Συντελεστής γάστρας (Block Coefficient, C_B)
- Νεκρό βάρος (Dead Weight, DWT)
- Βάρος άφορτου πλοίου (Lightship, LS [tn])
- Αριθμός φρακτών (Number of Bulkheads)
- Ηλικία (Age of ship [years])

Στη συνέχεια υπολογίζονται προσεγγιστικά το βάρος της μηχανολογικής εγκατάστασης (Weight of Machinery, W_M [tn]), το βάρος ενδιαίτησης και εξοπλισμού (Outfit Weight, W_{OT} [tn]) καθώς και το βάρος της μεταλλικής κατασκευής (Weight of Steel, W_{ST} [tn]) με τη χρήση τύπων που προέρχονται από στατιστική ανάλυση πάνω σε πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου (d' Almeida, 2009) και περιγράφονται σε προηγούμενο κεφάλαιο της εργασίας.

Τέλος, όλα τα δεδομένα εισόδου και οι τιμές που προέκυψαν από τους υπολογισμούς επιστρέφονται, σε μορφή πινάκων, στο κύριο πρόγραμμα.

engines_construction.m

Καλείται για τον υπολογισμό των εκπομπών αέριων ρύπων κατά τη φάση της κατασκευής των κύριων και βοηθητικών μηχανών σύμφωνα με τη μέθοδο που περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Τα αποτελέσματα επιστρέφουν στο πρόγραμμα σε μορφή πίνακα.

trials.m

Το συγκεκριμένο αρχείο υπολογίζει τις εκπομπές αέριων ρύπων κατά τη διάρκεια των δοκιμών των μηχανών σε εργοστασιακό (Shop tests) και θαλάσσιο (Sea trials) περιβάλλον. Προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί, ζητείται από τον χρήστη να εισάγει τη χρονική διάρκεια, σε ώρες, των δοκιμών καθώς και τον συντελεστή φόρτισης κάθε μηχανής κατά την διεξαγωγή τους.

Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε πίνακα και επιστρέφουν στο κύριο πρόγραμμα.

operation_single_trip.m / operation_many_trips.m

Ανάλογα με τον αριθμό ταξιδιών που εισήγαγε ο χρήστης προς ανάλυση, το πρόγραμμα καλεί ένα από τα δύο αρχεία που υπολογίζουν τις αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του πλοίου. Το πρώτο αρχείο αφορά σε ένα ταξίδι, ενώ το δεύτερο έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει υπολογισμούς για περισσότερες διαδρομές.

Για τον υπολογισμό των εκπομπών κατά το στάδιο της λειτουργίας του πλοίου, ο χρήστης καλείται να εισάγει ένα πλήθος δεδομένων που αφορούν στο ταξίδι που μελετάται. Τέτοια δεδομένα είναι τα εξής:

- Απόσταση ταξιδιού (Distance [nm])
- Μέση ταχύτητα ταξιδιού (Speed [kn])
- Ημέρες λειτουργίας (Sea days)
- Συντελεστής φόρτισης βοηθητικών μηχανών κατά τη λειτουργία (Auxiliary Engines Loading Factor during Operation)
- Ώρες παραμονής στο λιμάνι (Hours in Port)
- Συντελεστής φόρτισης βοηθητικών μηχανών κατά τη παραμονή στο λιμάνι (Auxiliary Engines Loading Factor in Port)
- Κατάσταση φόρτωσης (Loading condition [Load / Ballast])
- Μεταφερόμενο φορτίο (Cargo [tn])

Τέλος, τα δεδομένα εισόδου, καθώς και τα αποτελέσματα των υπολογισμών, αποθηκεύονται σε πίνακες.

machinery.m

Στο συγκεκριμένο αρχείο αθροίζονται σε πίνακες όλα τα αποτελέσματα εκπομπών αέριων ρύπων που έχουν υπολογιστεί για τα διαφορετικά στάδια της μηχανολογικής εγκατάστασης (Κατασκευή μηχανών, Δοκιμές σε εργοστασιακό και θαλάσσιο περιβάλλον, Λειτουργία).

hull.m

Το αρχείο συνάρτησης καλείται εφόσον ο χρήστης επιλέξει την ανάλυση της μεταλλικής γάστρας του πλοίου.

Υπολογίζει, με τη βοήθεια μεθόδων που περιγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, τις αέριες εκπομπές που παράγονται στα επιμέρους στάδια της ζωής της μεταλλικής κατασκευής.

Οι τιμές των αέριων εκπομπών που υπολογίζονται επιστρέφουν στο πρόγραμμα υπό τη μορφή πινάκων.

graphs_machinery.m / graphs_hull.m:

Τα δύο αρχεία εκτυπώνουν γραφήματα και διαγράμματα με βάση τους υπολογισμούς εκπομπών που έχουν προηγηθεί. Η κλήση τους γίνεται κατόπιν απαίτησης του χρήστη.

4.2.2 Δομή υπολογιστικού εργαλείου

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, η λειτουργία του υπολογιστικού μοντέλου διακρίνεται σε τρεις περιοχές:

- 1. Ανάλυση του υποσυστήματος της μεταλλικής κατασκευής
- 2. Ανάλυση του υποσυστήματος της μηχανολογικής εγκατάστασης
- 3. Παράλληλη ανάλυση των δύο υποσυστημάτων

Η καθεμία από τις περιοχές λειτουργίας περιλαμβάνει ένα πλήθος εντολών που ενεργοποιούνται προκειμένου να καταστεί εφικτή η εφαρμογή της μεθόδου Ανάλυση Κύκλου Ζωής.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το δομικό διάγραμμα του υπολογιστικού εργαλείου.



Σχήμα 9: Δομικό διάγραμμα υπολογιστικού εργαλείου

4.2.3 Δεδομένα εισόδου

Για τη χρήση του υπολογιστικού εργαλείου είναι απαραίτητη η καταχώρηση, από τον χρήστη, ενός αριθμού δεδομένων εισόδου (*Inputs*). Τα δεδομένα εισόδου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά στα κύριες διαστάσεις του υπό μελέτη πλοίου και στα χαρακτηριστικά της μηχανολογικής εγκατάστασης. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία που είναι απαραίτητα για να μελετηθεί κάποιο σενάριο λειτουργίας.



Σχήμα 10: Δεδομένα εισόδου υπολογιστικού εργαλείου

4.2.4 Γραφικό περιβάλλον και πλαίσια διαλόγου

Η χρήση του υπολογιστικού εργαλείου γίνεται μέσα από το περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής MATLAB. Ωστόσο, προκειμένου n χρήση του να είναι κατά το δυνατό φιλική, χωρίς να προϋποτίθενται εξειδικευμένες γνώσεις προγραμματισμού, το υπολογιστικό εργαλείο έχει αναπτυχθεί έτσι ώστε να χρησιμοποιεί περιβάλλον διεπαφής

(Interface) μέσα από πλαίσια διαλόγου που κατευθύνουν τον χρήστη ζητώντας του να εισάγει συγκεκριμένα δεδομένα. Επισημαίνεται ότι όλα τα πλαίσια διαλόγου, καθώς και το σύνολο του γραφικού περιβάλλοντος, είναι γραμμένα στην Αγγλική γλώσσα.

Ακολουθούν παραδείγματα πλαισίων διαλόγου με τη σειρά που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία του προγράμματος.



Εικόνα 3: Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού μοντέλου – Επιλογής υποσυστήματος για ανάλυση (Στιγμιότυπο οθόνης)

•	Engines	-		×
Number of installe	d main engines			
Number of installe 0	d auxiliary engines			
		ОК	С	ancel

Εικόνα 4: Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού μοντέλου – Αριθμός εγκατεστημένων μπχανών (Στιγμιότυπο οθόνης)



Εικόνα 5: Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού μοντέλου – Τύπος κύριας μπχανής (Στιγμιότυπο οθόνης)

🛃 Engines 🗕 🗆 🗙
Enter MCR of main engine [kW]
Enter MCR of first auxiliary engine [kW]
Enter MCR of second auxiliary engine [kW]
Enter MCR of third auxiliary engine [kW]
OK Cancel

Εικόνα 6: Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού μοντέλου – Χαρακτηριστικά μηχανών (Στιγμιότυπο οθόνης)

🛃 Shop T 😑 🗖 🗙
Enter duration of shop tests [hours]
Enter furation of sea trials [hours]
OK Cancel

Εικόνα 7: Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού μοντέλου – Διάρκεια δοκιμών (Στιγμιότυπο οθόνης)

*	Sea Trials 😑 🗖 🗙	
LF of	f Main Engine during Sea Trials	
LF of	f Auxiliary Engines during Sea Trials	1
	OK Cancel	

Εικόνα 8: Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού μοντέλου – Συντελεστής φόρτισης μηχανών κατά τη διάρκεια των δοκιμών (Στιγμιότυπο οθόνης)

🛃 Principal Dimensions & Characteristics of Ship 😑 🔍 🗙
Length LBP [m]
0
Breadth B [m]
0
Depth D [m]
0
Draft T [m]
0
Block Coefficient CB
0
Deadweight DWT [tn]
<u> </u>
Lightship LS [tn]
0
Ane of shin (vears)
0
OK Cancel

Εικόνα 9: Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού μοντέλου – Κύριες διαστάσεις πλοίου (Στιγμιότυπο οθόνης)



Εικόνα 10: Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού μοντέλου – Αριθμός υπό μελέτη ταξιδιών (Στιγμιότυπο οθόνης)

🛃 Characteristics of trip 😑 🔍
Number of trip
Distance of trip [nm]
Actual Speed [kn]
L.F. of Auxiliary Engines in Operation Mode
L.F. of Auxiliary Engines in Port
Sea days
Hours in port
Press 1 for Load Condition or 2 for Ballast Condition
Cargo (tn)
OK Cancel

Εικόνα 11: Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού μοντέλου – Χαρακτηριστικά ταξιδιού (Στιγμιότυπο οθόνης)



Εικόνα 12: Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού μοντέλου – Επιλογή εκτύπωσης γραφημάτων (Στιγμιότυπο οθόνης)

🛃 Than 🗕 🗆	×
Operation Completed	
ОК	

Εικόνα 13: Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού μοντέλου – Μήνυμα τερματισμού της διαδικασίας (Στιγμιότυπο οθόνης)

5 Σενάριο/α ανάλυσης

5.1 Περιγραφή του υπό μελέτη πλοίου

Η εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου έγινε για περίπτωση πραγματικού πλοίου με βάση στοιχεία που παραχωρήθηκαν από την πλοιοκτήτρια εταιρία. Το πλοίο, στο οποίο εφαρμόστηκε η μέθοδος LCA με χρήση του προγράμματος που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι ένα Bulk Carrier Capesize 206104 DWT.

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι κύριες διαστάσεις και τα βασικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πλοίου:

Υπό μελέτη πλοίο			
ТҮРЕ	Bulk Carrier		
NAME	Not provided		
LBP [m]	294		
B [m]	50		
D [m]	24.9		
T [m]	18.466		
C _B	0.8483		
DWT [tn]	206104		
LS [tn]	30383		
Δ [tn]	236487		
Payload [tn]	198558		
Number of bulkheads	9 C/H + FP + AP B/H		
Service Speed [kn]	15		
Age of ship [years]	3		

Πίνακας 15: Κύριες διαστάσεις και χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πλοίου

5.2 Περιγραφή της μηχανολογικής εγκατάστασης του υπό μελέτη πλοίου

Το πλοίο που μελετάται έχει εγκατεστημένη μία κύρια μηχανή αργόστροφη δίχρονη καθώς και τρεις βοηθητικές μηχανές τετράχρονες.

Τα στοιχεία των μηχανών του πλοίου φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Μηχανολογική εγκατάσταση			
Main Engine (Number)1 (Low Speed)			
Auxiliary Engines (Number) 3			
Main Engine [kW] 18660 @ 91 RPM			
Auxiliary Engines [kW]	900		

Πίνακας 16: Χαρακτηριστικά μηχανολογικής εγκατάστασης του υπό μελέτη πλοίου

5.3 Σενάριο ανάλυσης μεταλλικής κατασκευής

Η εφαρμογή της μεθόδου LCA στη μεταλλική κατασκευή του πλοίου θα γίνει για χρονικό ορίζοντα ζωής είκοσι ετών. Η επιλογή αυτή έγινε προκειμένου να υπάρξει μια συνολική εικόνα των εκπομπών αέριων ρύπων σε ένα συνηθισμένο χρονικό κύκλο ζωής ενός πλοίου μεταφοράς χύδην φορτίου. Μέσα σε ένα τέτοιο βάθος χρόνου, είναι δυνατή η μελέτη και ανάλυση όλων των κύριων σταδίων και διεργασιών που αφορούν στη μεταλλική κατασκευή και περιγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.

5.4 Σενάριο ανάλυσης μηχανολογικής εγκατάστασης

Το σενάριο αποτελείται από έναν αριθμό επιμέρους σεναρίων που αντιστοιχούν σε κάθε στάδιο της ζωής του πλοίου.

5.4.1 Σενάριο δοκιμών σε εργοστασιακό περιβάλλον

Για το συγκεκριμένο στάδιο, θεωρείται ότι οι μπχανές τίθενται σε δοκιμαστική λειτουργία για χρονική διάρκεια 24 ωρών. Η ειδική κατανάλωση καυσίμου λαμβάνεται από βιβλιογραφικές αναφορές ίση με 0.170 kg/kWh για την κύρια μπχανή και 0.200 kg/kWh για τις βοηθητικές μπχανές (Andersen, 2012).

5.4.2 Σενάριο δοκιμών σε θαλάσσιο περιβάλλον

Σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς των νηογνωμόνων, για τη φόρτιση των μηχανών κατά τη διάρκεια των δοκιμών σε θαλάσσιο περιβάλλον ισχύουν τα εξής (IACS, 2015):

Για τις κύριες μηχανές πρόωσης:

- 1. Δοκιμή στο 100% του MCR για τουλάχιστον 60 λεπτά.
- 2. Δοκιμή στο 110% του MCR για τουλάχιστον 15 λεπτά.

 Δοκιμή στο 90%, 75%, 50% και 25% για χρονική διάρκεια που συμφωνείται με τον κατασκευαστή.

Για τις βοηθητικές μηχανές:

- 1. Δοκιμή στο 100% του MCR για τουλάχιστον 60 λεπτά.
- Δοκιμή στο 110% του MCR για τουλάχιστον 15 λεπτά και εφόσον σε αυτό το διάστημα έχει σταθεροποιηθεί η λειτουργία τους.
- Δοκιμή στο 75%, 50% και 25% για χρονική διάρκεια που συμφωνείται με τον κατασκευαστή.

Στο παρόν σενάριο λειτουργίας, και προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το μέγεθος των δεδομένων εισαγωγής, θεωρείται ότι οι μπχανές τίθενται σε δοκιμαστική λειτουργία για 24 ώρες με συντελεστή φόρτισης 80%. Πρόκειται για μια παραδοχή που είναι επιτρεπτή στο πλαίσιο της μελέτης της γενικής εικόνας των παραγόμενων αέριων ρύπων στο συγκεκριμένο στάδιο.

5.4.3 Σενάριο λειτουργίας

Για τη λειτουργία του πλοίου λήφθηκαν ως δεδομένα πραγματικά στοιχεία ταξιδιών ενός περίπου χρόνου τα οποία παραχωρήθηκαν από την πλοιοκτήτρια εταιρία. Ελλείψει περισσότερων δεδομένων, στο τέλος της ανάλυσης πραγματοποιείται αναγωγή των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τον υπολογιστικό πρόγραμμα σε χρονικό ορίζοντα είκοσι ετών.

Για την αναγωγή αυτή θεωρείται συμβατικά ότι το πλοίο πραγματοποιεί κάθε χρόνο τα ίδια ακριβώς ταξίδια σε βάθος εικοσαετίας. Κάτι τέτοιο, προφανώς, δεν μπορεί να ισχύει αφού, ακόμη κι αν ταξιδεύει στην ίδια γραμμή, υπάρχει ένα πλήθος παραγόντων που διαφοροποιούνται (καιρός, θαλάσσια ρεύματα, ταχύτητα, φόρτωση κ.λπ.). Είναι κατανοητό, ωστόσο, ότι στη μελέτη της συνολικής εικόνας της λειτουργίας του πλοίου στον κύκλο ζωής τους, η διαφοροποίηση των συγκεκριμένων παραγόντων δεν επηρεάζουν καθοριστικά τα συμπεράσματα που έχουν σχέση με την ενεργειακή του αποτύπωση και συνεπώς την εκτίμηση των αέριων ρύπων που θα παραχθούν.

Στους πίνακες 17 και 18 των επόμενων σελίδων περιλαμβάνονται τα πραγματικά στοιχεία ταξιδιών ενός έτος του υπό μελέτη πλοίου όπως προωθήθηκαν από την πλοιοκτήτρια εταιρία. Όπως φαίνεται, το πλοίο καλύπτει κυρίως δρομολόγια μεταξύ Αυστραλίας (λιμάνι Port Hedland στη Δυτική Αυστραλία) και Κίνας (λιμάνια Qingdao, Jingtang κ.λπ.).

Τέλος, στον πίνακα 19 συγκεντρώνονται όλα τα δεδομένα εισόδου του υπολογιστικού εργαλείου για κάθε ταξίδι του πλοίου.

	Διαδρομή	Αναχώρηση	Άφιξη
1	Jingtang Port Hedland	29/5/2014 12·30	11/6/2014
2	Port Hedland	20/6/2014	3/7/2014
	Oingdao	17:00	22·00
3	Qingdao	6/7/2014	18/7/2014
	Port Hedland	09·30	12:00
4	Port Hedland	25/7/2014	07/08/2014
5	Caofeidian Port Hedland	14/8/2014 08:00	27/08/2014
6	Port Hedland	7/9/2014	20/09/2014
7	Caofeidian	25/9/2014	27/09/2014
	Yosu	13:00	20:00
8	Yosu	28/9/2014	09/10/2014
	Port Hedland	06:00	21:30
9	Port Hedland	13/10/2014	26/10/2014
	Qingdao	03:30	08:30
10	Rizhao	04/11/2014	16/11/2014
	Port Hedland	12:30	18:00
11	Port Hedland	04/12/2014	17/12/2014
	Qingdao	11:30	19:00
12	Lianyungang	21/12/2014	22/12/2014
	Qingdao	18:30	05:15
13	Qingdao	24/12/2014	05/01/2015
	Port Hedliand	04:00	22:00
14	Port Hedland	13/01/2015	27/01/2015
	Qingdao	17:00	12:00
15	Jingtang	03/02/2015	16/02/2015
	Port Hedland	09:00	19:00
16	Port Hedland	21/02/2015	07/03/2015
	Tianjin	02:30	19:30
17	Qingdao	09/03/2015	11/03/2015
	Xingang (Tianjin)	14:00	10:30
18	Xingang (Tianjin)	15/03/2015	28/03/2015
	Port Hedland	02:00	14:00
19	Port Hedland	19/04/2015	03/05/2015
	Qingdao	12:30	07:00
20	Zhoushan	04/05/2015	05/05/2015
	Taicang	13:30	01:00
21	Taicang	07/05/2015	19/05/2015
	Port Hedland	20:00	12:00

Πίνακας 17: Στοιχεία ταξιδιών του υπό μελέτη πλοίου

	Διαδρομή	Κατάσταση φόρτωσης	Απόσταση (nm)	Ταχύτητα (kn)	Ημέρες ταξιδιού
1	Jingtang Port Hedland	Ballast	3863	12.563	12.7917
2	Port Hedland Qingdao	Load	3619	11.084	13.6042
3	Qingdao Port Hedland	Ballast	3614	11.987	12.5625
4	Port Hedland Oingdao	Load	3847	10.867	14.75
5	Caofeidian Port Hedland	Ballast	3860	12.313	13.0625
6	Port Hedland Oingdao	Load	3858	10.687	15.0417
7	Caofeidian Yosu	Ballast	655	12.476	2.1875
8	Yosu Port Hedland	Ballast	3490	11.952	12.1667
9	Port Hedland Oingdao	Load	3633	10.894	13.8959
10	Rizhao Port Hedland	Ballast	3650	12.511	12.1563
11	Port Hedland Oingdao	Load	3602	9.683	15.5
12	Lianyungang Qingdao	Load	75	13.043	0.2396
13	Qingdao Port Hedliand	Ballast	3652	12.093	12.5833
14	Port Hedland Oingdao	Load	3570	10.818	14.75
15	Jingtang Port Hedland	Ballast	3551	12.46	12.875
16	Port Hedland Tianjin	Load	3634	10.736	14.1041
17	Qingdao Xingang (Tianiin)	Load	475	10.556	1.875
18	Xingang (Tianjin) Port Hedland	Ballast	3881	12.109	13.3542
19	Port Hedland Oingdao	Load	3141	10.944	11.9584
20	Zhoushan Taicang	Load	109	12.475	0.3646
21	Taicang Port Hedland	Ballast	3326	12.575	11.0209

Πίνακας 18: Στοιχεία ταξιδιών του υπό μελέτη πλοίου

	Trip	Trip	Trip
	Jingtang	Port Hedland	Qingdao
	Port Hedland	Qingdao	Port Hedland
Distance [nm]	3863	3619	3614
Speed [kN]	12.563	11.084	11.987
L.F. A.E.	0.5 (x2)	0.5 (x2)	0.5 (x2)
(Operation)			
L.F. A.E. (Port)	0.2 (x2)	0.2 (x2)	0.2 (x2)
Operation [days]	12.917	13.729	12.688
Hours in Port	216	59.5	180
Condition	Ballast	Full Load	Ballast
Payload [tn]	-	198558	-
	Port Hedland	Caofeidian	Port Hedland
	Qingdao	Port Hedland	Qingdao
Distance [nm]	3847	3860	3858
Speed [kN]	10.867	12.313	10.687
L.F. A.E.	0.5 (x2)	0.5 (x2)	0.5 (x2)
(Operation)			
L.F. A.E. (Port)	0.2 (x2)	0.2 (x2)	0.2 (x2)
Operation [days]	14.875	13.188	15.167
Hours in Port	120	264	120
Condition	Full Load	Ballast	Full Load
Payload [tn]	198558	-	198558
	Caofeidian	Yosu	Port Hedland
	Yosu	Port Hedland	Oingdao
Distance [nm]	655	3490	3633
Speed [kN]	12.476	11.952	10.894
L.F. A.E.	0.5 (x2)	0.5 (x2)	0.5 (x2)
(Operation)			
L.F. A.E. (Port)	0.2 (x2)	0.2 (x2)	0.2 (x2)
Operation [davs]	2.313	12.292	14.021
Hours in Port	10	72	144
Condition	Ballast	Ballast	Full Load
Pavload [tn]	-	-	198558
	Rizhao	Port Hedland	Lianyungang
	Port Hedland	Qingdao	Qingdao
Distance [nm]	3650	3602	75
Speed [kN]	12.511	9.683	13.043
L.F. A.E.	0.5 (x2)	0.5 (x2)	0.5 (x2)
(Operation)			
L.F. A.E. (Port)	0.2 (x2)	0.2 (x2)	0.2 (x2)
Operation [days]	12.281	15.625	0.365
Hours in Port	408	48	36
Condition	Ballast	Full Load	Full Load
Payload [tn]	-	198558	198558

Πίνακας 19: Δεδομένα εισόδου λειτουργίας του υπό μελέτη πλοίου

	Trip	Trip	Trip
	Qingdao	Port Hedland	Jingtang
	Port Hedland	Qingdao	Port Hedland)
Distance [nm]	3652	3570	3551
Speed [kN]	12.093	10.818	12.460
L.F. A.E.	0.5 (x2)	0.5 (x2)	0.5 (x2)
(Operation)			
L.F. A.E. (Port)	0.2 (x2)	0.2 (x2)	0.2 (x2)
Operation [days]	12.708	14.875	13.000
Hours in Port	192	144	96
Condition	Ballast	Full Load	Ballast
Payload [tn]	-	198558	-
		0. 1	X. (.
	Port Hedland	Qingdao Vingeng (Tioniin)	Xingang (Tianjin)
Distance []	Tianjin 2024	Aingang (Tianjin)	Port Hediand
Distance [nm]	3634	4/5	2001
	10.736	10.556	12.109
L.F. A.E.	0.5 (x2)	0.5 (x2)	0.5 (x2)
(Operation)			
L.F. A.E. (Port)	0.2 (x2)	0.2 (x2)	0.2 (x2)
Operation [days]	14.229	2.000	13.479
Hours in Port	36	72	456
Condition	Full Load	Full Load	Ballast
Payload [tn]	198558	198558	-
	Port Hedland	Zhoushan	Taicang
	Oingdao	Taicang	Port Hedland
Distance [nm]	3141	109	3326
Speed [kN]	10.944	12.475	12.575
L.F. A.E.	$0.5(x^2)$	$0.5(x^2)$	$0.5(x^2)$
(Operation)	0.0 (//2)		0.0 (//2)
L.F. A.E. (Port)	$0.2(x^2)$	0.2 (x2)	0 2 (x2)
Operation [days]	12 083	0.489	11 146
Hours in Port	30	48	48
Condition	Full Load	Full Load	Ballast
Davload [+n]	108559	100550	Dallasi
r ayivau [lii]	00000	00000	-

6 Αποτελέσματα ανάλυσης μεταλλικής κατασκευής

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η ανάλυση της μεταλλικής κατασκευής γίνεται σε βάθος εικοσαετίας ώστε να υπάρχει η δυνατότητα αποτύπωσης μιας συνολικής εικόνας εκπομπών αέριων ρύπων στον κύκλο ζωής του πλοίου. Ακολουθούν πίνακες αποτελεσμάτων και σχετικά διαγράμματα για κάθε διεργασία που αφορά στη μεταλλική κατασκευή.

6.1 Παραγωγή χάλυβα

Είδος ρύπου	Μονάδα	Ποσότητα
CO ₂	tn	27376.7774
NO _X	tn	160.5225
SO _X	tn	153.4782
PM	tn	25.5341
CO	tn	874.9024
CH ₄	tn	4.4850
NMVOC	tn	0.2980

Πίνακας 20: Αέριες εκπομπές κατά την παραγωγή του χάλυβα



Διάγραμμα 5: Αέριες εκπομπές υπό μελέτη πλοίου κατά την παραγωγή του χάλυβα

6.2 Κοπή χάλυβα

Είδος ρύπου	Μονάδα	Ποσότητα
CO ₂	tn	199.0507
NOx	tn	0.0804
SOx	tn	1.3908
PM	tn	0.1327
СО	tn	0.1894
CH ₄	tn	0.0130
NMVOC	tn	0.0636

Πίνακας 21: Αέριες εκπομπές κατά την κοπή του χάλυβα



Διάγραμμα 6: Αέριες εκπομπές υπό μελέτη πλοίου κατά την κοπή του χάλυβα

6.3 Συγκόλληση χάλυβα

Είδος ρύπου	Μονάδα	Ποσότητα
CO ₂	tn	45.3177
NOx	tn	0.0183
SO _X	tn	0.3166
PM	tn	0.0302
CO	tn	0.0431
CH ₄	tn	0.0030
NMVOC	tn	0.0145

Πίνακας 22: Αέριες εκπομπές κατά τη συγκόλληση του χάλυβα





6.4 Αντικατάσταση χάλυβα

Είδος ρύπου	Μονάδα	Ποσότητα
CO ₂	tn	14811.6541
NOx	tn	86.8474
SOx	tn	83.0363
PM	tn	13.8147
СО	tn	473.3483
CH ₄	tn	2.4265
NMVOC	tn	0.1612

Πίνακας 23: Αέριες εκπομπές κατά την αντικατάσταση του χάλυβα



Διάγραμμα 8: Αέριες εκπομπές υπό μελέτη πλοίου κατά την αντικατάσταση του χάλυβα

6.5 Κοπή αντικατεστημένου χάλυβα

Είδος ρύπου	Μονάδα	Ποσότητα
CO ₂	tn	1.4362
NO _x	tn	0.0005
SO _X	tn	0.0100
PM	tn	0.0010
CO	tn	0.0014
CH_4	tn	0.0001
NMVOC	tn	0.0005

Πίνακας 24: Αέριες εκπομπές κατά την κοπή του αντικατεστημένου χάλυβα



Διάγραμμα 9: Αέριες εκπομπές υπό μελέτη πλοίου κατά την κοπή του αντικατεστημένου χάλυβα

6.6 Συγκόλληση αντικατεστημένου χάλυβα

Είδος ρύπου	Μονάδα	Ποσότητα
CO ₂	tn	4.5318
NO _x	tn	0.0018
SO _X	tn	0.0317
PM	tn	0.0030
CO	tn	0.0043
CH ₄	tn	0.0003
NMVOC	tn	0.0014

Πίνακας 25: Αέριες εκπομπές κατά τη συγκόλληση του αντικατεστημένου χάλυβα



Διάγραμμα 10: Αέριες εκπομπές υπό μελέτη πλοίου κατά τη συγκόλληση του αντικατεστημένου χάλυβα

6.7 Απόσυρση

Είδος ρύπου	Μονάδα	Ποσότητα
CO ₂	tn	9308.1043
NO _X	tn	120.3919
SO _X	tn	153.4782
PM	tn	25.5341
CO	tn	874.9024
CH ₄	tn	2.3771
NMVOC	tn	0.2980

Πίνακας 26: Αέριες εκπομπές κατά τη διαδικασία της απόσυρσης





6.8 Συνολικές εκπομπές ρύπων της μεταλλικής κατασκευής

Είδος ρύπου	Μονάδα	Ποσότητα
CO ₂	tn	51746.8723
NO _x	tn	367.8629
SO _x	tn	391.7417
PM	tn	65.0497
СО	tn	2223.3914
CH ₄	tn	9.3049
NMVOC	tn	0.8371

Πίνακας 27: Συνολικές αέριες εκπομπές της μεταλλικής κατασκευής

Από την ανάλυση του κύκλου ζωής της μεταλλικής κατασκευής προκύπτει ότι το διοξείδιο του άνθρακα CO₂ είναι ο ρύπος με τις μεγαλύτερες ποσότητες αέριων εκπομπών. Συγκεκριμένα, οι διεργασίες που απαιτούνται για το υποσύστημα της μεταλλικής κατασκευής σε βάθος 20 ετών παράγουν περίπου 51747 τόνους CO₂. Η μελέτη των αποτελεσμάτων δείχνει ότι ιδιαίτερα αυξημένες τιμές εκπομπών διοξειδίων του άνθρακα παρουσιάζονται στις διεργασίες που αφορούν στην παραγωγή και ανακύκλωσή του. Είναι γεγονός, ωστόσο, ότι σε κάθε στάδιο οι εκπομπές CO₂ είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις εκπομπές των υπόλοιπων αέριων ρύπων. Ακόμη, σε αυξημένα επίπεδα κινούνται οι συνολικές εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα CO. Οι υπόλοιπες εκπομπές αέριων ρύπων είναι εμφανώς μικρότερες χωρίς, ωστόσο, να αμελούνται οι ποσότητες των οξειδίων του αζώτου NO_x και του θείου SO_x που ανέρχονται στους 368 τόνους και 392 τόνους αντίστοιχα.

Η περαιτέρω επεξεργασία των παραπάνω αποτελεσμάτων δείχνει ότι τα στάδια που συνεισφέρουν τις μεγαλύτερες ποσότητες αέριων ρύπων είναι αυτά της παραγωγής και της ανακύκλωσης χάλυβα, ενώ ιδιαίτερα αυξημένοι εμφανίζονται οι ρύποι κατά τη διαδικασία της αντικατάστασης του χάλυβα.

Στα σχήματα που ακολουθούν αποτυπώνεται οι ποσοστιαία συνεισφορά των διαφόρων διεργασιών στις συνολικές εκπομπές αέριων ρύπων.



Σχήμα 11: Εκπομπές CO2 ανά διεργασία της μεταλλικής κατασκευής



Σχήμα 12: Εκπομπές CO ανά διεργασία της μεταλλικής κατασκευής



Σχήμα 13: Εκπομπές NO_x ανά διεργασία της μεταλλικής κατασκευής



Σχήμα 14: Εκπομπές SO_X ανά διεργασία της μεταλλικής κατασκευής







Σχήμα 16: Εκπομπές CH4 ανά διεργασία της μεταλλικής κατασκευής



Σχήμα 17: Εκπομπές NMVOC ανά διεργασία της μεταλλικής κατασκευής

Στο διάγραμμα που ακολουθεί συγκεντρώνονται όλες οι εκπομπές καυσαερίων στα διαφορετικά στάδια διεργασιών που συντελούνται στον κύκλο ζωής του πλοίου.



Διάγραμμα 12: Αέριες εκπομπές (σε τόνους) του υπό μελέτη πλοίου ανά διεργασία της μεταλλικής κατασκευής

7 Αποτελέσματα ανάλυσης μηχανολογικής εγκατάστασης

Η μπχανολογική εγκατάσταση μελετάται μέσα από τέσσερα επιμέρους στάδια: το στάδιο κατασκευής των μπχανών, τις δοκιμές σε εργοστασιακό περιβάλλον, τις δοκιμές στης θάλασσα και τη λειτουργία του πλοίου. Ειδικότερα για το τελευταίο στάδιο, η ανάλυση λαμβάνει ως δεδομένα πραγματικά στοιχεία ενός έτους ταξιδιών του πλοίου.

7.1 Κατασκευή μηχανών

Είδος ρύπου	Μονάδα	Ποσότητα
CO ₂	tn	1735.5604
NOx	tn	5.5242
SO _x	tn	0.5933
PM	tn	11.3962
CO	tn	3.7442
CH ₄	tn	2.1278
NMVOC	tn	0.3683

Πίνακας 28: Αέριες εκπομπές κατά την κατασκευή των μηχανών



Διάγραμμα 13: Αέριες εκπομπές υπό μελέτη πλοίου κατά την κατασκευή των μηχανών

7.2 Δοκιμές σε εργοστασιακό περιβάλλον

Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθεται n κατανάλωσn καυσίμου των μηχανών όπως προέκυψε από την εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου.

Μηχανή	Μονάδα	Ποσότητα
Κύριες μηχανές	tn	844.6262
Βοηθητικές μηχανές	tn	15.1200
Συνολική κατανάλωση	tn	859.7462

Πίνακας 29: Κατανάλωση καυσίμου μηχανών κατά τις δοκιμές σε εργοστασιακό περιβάλλον

Ακολουθούν οι εκπομπές αέριων ρύπων για το συγκεκριμένο στάδιο για τρεις περιπτώσεις χρήσης διαφορετικών καυσίμων.

		Ποσότητα ανά είδος καυσίμου		
Είδος ρύπου	Μονάδα	HFO	MDO	LNG
CO ₂	tn	2677.2498	2756.3464	2364.3022
NO _x	tn	67.4557	63.4063	6.7318
SO _x	tn	42.1963	2.2697	0.0172
PM	tn	6.0096	0.8769	0.1548
СО	tn	2.3815	2.3815	6.7318
CH_4	tn	0.0516	0.0516	44.0190
N_2O	tn	0.1376	0.1290	0.0946
NMVOC	tn	2.6480	2.6480	2.5878

Πίνακας 30: Αέριες εκπομπές κατά τις δοκιμές σε εργοστασιακό περιβάλλον



Διάγραμμα 14: Αέριες εκπομπές υπό μελέτη πλοίου κατά τις δοκιμές σε εργοστασιακό περιβάλλον

7.3 Δοκιμές σε θαλάσσιο περιβάλλον

Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθεται η κατανάλωση καυσίμου των μηχανών όπως προέκυψε από την εφαρμογή του υπολογιστικού προγράμματος.

Μηχανή	Μονάδα	Ποσότητα
Κύριες μηχανές	tn	60.90624
Βοηθητικές μηχανές	tn	6.912
Συνολική κατανάλωση	tn	67.81824

Πίνακας 31: Κατανάλωση καυσίμου μηχανών κατά τις δοκιμές σε θαλάσσιο περιβάλλον

Ακολουθούν οι εκπομπές αέριων ρύπων για το συγκεκριμένο στάδιο για τρεις περιπτώσεις χρήσης διαφορετικών καυσίμων.

		Ποσότητα ανά είδος καυσίμου		
Είδος ρύπου	Μονάδα	HFO	MDO	LNG
CO ₂	tn	211.1860	217.4253	186.5002
NOx	tn	5.3210	5.0016	0.5310
SOx	tn	3.3285	0.1790	0.0014
PM	tn	0.4740	0.0692	0.0122
CO	tn	0.1879	0.1879	0.5310
CH4	tn	0.0041	0.0041	3.4723
N_2O	tn	0.0109	0.0102	0.0075
NMVOC	tn	0.2089	0.2089	0.2041

Πίνακας 32: Αέριες εκπομπές κατά τις δοκιμές σε θαλάσσιο περιβάλλον



Διάγραμμα 15: Αέριες εκπομπές υπό μελέτη πλοίου κατά τις δοκιμές σε θαλάσσιο περιβάλλον
7.4 Λειτουργία

7.4.1 Αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια κάθε ταξιδιού

Σε πρώτη φάση, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για καθένα από τα 21 ταξίδια που αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για κάθε ταξίδι γίνεται μέσα από τρεις πίνακες. Στον πρώτο πίνακα εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά του ταξιδιού που αποτέλεσαν τα δεδομένα εισόδου για την εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου. Ο δεύτερος πίνακας αφορά στα αποτελέσματα που προέκυψαν για την κατανάλωση καυσίμου της μηχανολογικής εγκατάστασης. Στον τρίτο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εκπομπών ρύπων κατά τη διάρκεια κάθε ταξιδιού όπως υπολογίστηκαν για την περίπτωση χρήσης τριών διαφορετικών καυσίμων.

Στο ακόλουθο διάγραμμα, που κατασκευάστηκε από τον υπολογιστικό εργαλείο με βάση τα δεδομένα εισόδου για ένα έτος λειτουργίας του υπό μελέτη πλοίου, αποτυπώνονται οι αποστάσεις κάθε ταξιδιού σε σχέση με τις αντίστοιχες ταχύτητες που ανέπτυξε το πλοίο προκειμένου να τις διανύσει.



Διάγραμμα 16: Διανυθείσα απόσταση και μέση ταχύτητα υπό μελέτη πλοίου για κάθε ταξίδι

Ταξίδι 1º: Jingtang - Port Hedland

Διαδρομή	Jingtang	
	Port Hedland	
Αναχώρηση	29/5/2014	
Άφιξη	11/6/2014	
Απόσταση [nm]	3863	
Ταχύτητα [kn]	12.563	
RPM	67.6407	
Ημέρες ταξιδιού	12.917	
Ώρες στο λιμάνι	216	
Κατάσταση φόρτωσης	Ballast	
Φορτίο [tn]	-	

Πίνακας 33: Χαρακτηριστικά 1°υ ταξιδιού

Πίνακας 34: Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του 1^{ου} ταξιδιού

Μηχανή	Μονάδα	Ποσότητα
Κύριες μηχανές	tn	572.1454
Βοηθητικές μηχανές	tn	70.8121
Συνολική κατανάλωση	tn	642.9575

Πίνακασ	; 35: Αέ	ριες	εκπομ	πές κ	κατά τ	n διά	ρκεια	του	100	ταξιδιού	
---------	-----------------	------	-------	-------	--------	-------	-------	-----	-----	----------	--

		Ποσότητα ανά είδος καυσίμου			
Είδος ρύπου	Μονάδα	HFO	MDO	LNG	
CO ₂	tn	2002.1696	2061.3217	1768.1331	
NOx	tn	50.44644	47.41811	5.034357	
SOx	tn	31.55635	1.697408	0.012859	
PM	tn	4.494273	0.655817	0.115732	
CO	tn	1.780992	1.780992	5.034357	
CH ₄	tn	0.038577	0.038577	32.91942	
N_2O	tn	0.102873	0.096444	0.070725	
NMVOC	tn	1.980309	1.980309	1.935302	

Tαξίδι 2º: Port Hedland - Qingdao

Διαδρομή	Port Hedland
	Qingdao
Αναχώρηση	20/6/2014
Άφιξη	3/7/2014
Απόσταση [nm]	3619
Ταχύτητα [kn]	11.084
RPM	67.7953
Ημέρες ταξιδιού	13.729
Ώρες στο λιμάνι	59.5
Κατάσταση φόρτωσης	Full Load
Φορτίο [tn]	198558

Πίνακας 36: Χαρακτηριστικά 2^{ου} ταξιδιού

Πίνακας 37: Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του 2^{ου} ταξιδιού

Μηχανή	Μονάδα	Ποσότητα
Κύριες μηχανές	tn	417.8887
Βοηθητικές μηχανές	tn	63.0541
Συνολική κατανάλωση	tn	480.9428

Πίνακας 🛙	38: Αέριες	εκπομπές κα	τά τη διάρκεια	α του 2 ^{ου} ταξιδιού
-----------	-------------------	-------------	----------------	--------------------------------

	Ποσότητα ανά είδος καυσίμου			
Μονάδα	HFO	MDO	LNG	
tn	1497.6559	1541.9026	1322.5927	
tn	37.7348	35.4695	3.7658	
tn	23.6047	1.2697	0.0096	
tn	3.3618	0.4906	0.0866	
tn	1.3322	1.3322	3.7658	
tn	0.0289	0.0289	24.6243	
tn	0.0770	0.0721	0.0529	
tn	1.4813	1.4813	1.4476	
	Μονάδα tn tn tn tn tn tn tn tn tn	ΠοσότηΜονάδαΗFOtn1497.6559tn37.7348tn23.6047tn3.3618tn1.3322tn0.0289tn0.0770tn1.4813	Ποσότητα ανά είδος καΜονάδαHFOMDOtn1497.65591541.9026tn37.734835.4695tn23.60471.2697tn3.36180.4906tn1.33221.3322tn0.02890.0289tn0.07700.0721tn1.48131.4813	

Ταξίδι 3º: Qingdao - Port Hedland

Διαδρομή	Qingdao		
	Port Hedland		
Αναχώρηση	6/7/2014		
Άφιξη	18/7/2014		
Απόσταση [nm]	3614		
Ταχύτητα [kn]	11.987		
RPM	65.7274		
Ημέρες ταξιδιού	12.688		
Ώρες στο λιμάνι	180		
Κατάσταση φόρτωσης	Ballast		
Φορτίο [tn]	-		

Πίνακας 39: Χαρακτηριστικά 3^{ου} ταξιδιού

Πίνακας 40: Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του 3^{ου} ταξιδιού

Μηχανή	Μονάδα	Ποσότητα
Κύριες μηχανές	tn	488.0964
Βοηθητικές μηχανές	tn	67.2300
Συνολική κατανάλωση	tn	555.3264

Πίνακας 41: Αέ	οιες εκπομπές	κατά τη διάρ	κεια του 3 ^{ου}	ταξιδιού
-----------------------	---------------	--------------	--------------------------	----------

		Ποσότητα ανά είδος καυσίμου			
Είδος ρύπου	Μονάδα	HFO	MDO	LNG	
CO ₂	tn	1729.28645	1780.37648	1527.147636	
NO _X	tn	43.57091037	40.95532296	4.348205814	
SO _X	tn	27.25542035	1.46606173	0.011106528	
PM	tn	3.881731627	0.566432941	0.099958754	
CO	tn	1.538254164	1.538254164	4.348205814	
CH_4	tn	0.033319585	0.033319585	28.43271235	
N_2O	tn	0.088852226	0.083298962	0.061085905	
NMVOC	tn	1.710405352	1.710405352	1.671532503	

Ταξίδι 4º: Port Hedland - Qingdao

Διαδρομή	Port Hedland
	Qingdao
Αναχώρηση	25/7/2014
Άφιξη	7/8/2014
Απόσταση [nm]	3847
Ταχύτητα [kn]	10.867
RPM	67.5699
Ημέρες ταξιδιού	14.875
Ώρες στο λιμάνι	120
Κατάσταση φόρτωσης	Full Load
Φορτίο [tn]	198558

Πίνακας 42: Χαρακτηριστικά 4^{ου} ταξιδιού

Πίνακας 4	3: Υπολογ	/ισμός	κατανάλωσης	καυσίμου	μηχανών κ	ατά τη διά	άρκεια του	4ου ταξιδιού
		1.000					-p	

Μηχανή	Μονάδα	Ποσότητα
Κύριες μηχανές	tn	426.9913
Βοηθητικές μηχανές	tn	72.3600
Συνολική κατανάλωση	tn	499.3513

Πίνακας 44: Αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια του 4 ^{ου} ταξιδια	υÚ
---	----

		Ποσότητα ανά είδος καυσίμου			
Είδος ρύπου	Μονάδα	HFO	MDO	LNG	
CO ₂	tn	1554.980011	1600.920332	1373.21613	
NO _X	tn	39.17910458	36.82715986	3.909920837	
SO _x	tn	24.50816279	1.318287485	0.009987026	
PM	tn	3.490465728	0.509338347	0.089883238	
CO	tn	1.383203157	1.383203157	3.909920837	
CH ₄	tn	0.029961079	0.029961079	25.56678759	
N_2O	tn	0.079896211	0.074902698	0.054928645	
NMVOC	tn	1.538002066	1.538002066	1.503047474	

Ταξίδι 5º: Caofeidian - Port Hedland

Διαδρομή	Caofeidian
	Port Hedland
Αναχώρηση	14/8/2014
Άφιξη	27/8/2014
Απόσταση [nm]	3860
Ταχύτητα [kn]	12.313
RPM	67.74
Ημέρες ταξιδιού	13.188
Ώρες στο λιμάνι	264
Κατάσταση φόρτωσης	Ballast
Φορτίο [tn]	-

Πίνακας 45: Χαρακτηριστικά 5^{ου} ταξιδιού

Πίνακας 46: Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του 5^{ου} ταξιδιού

Μηχανή	Μονάδα	Ποσότητα
Κύριες μηχανές	tn	550.0675
Βοηθητικές μηχανές	tn	75.4380
Συνολική κατανάλωση	tn	625.5055

Πίνακας 47: Αέρ	ιες εκπομπές	; κατά τη διά	ρκεια του 5	υ ταξιδιού
-----------------	--------------	---------------	-------------	------------

		Ποσότητα ανά είδος καυσίμου			
Είδος ρύπου	Μονάδα	HFO	MDO	LNG	
CO ₂	tn	1947.8240	2005.3706	1720.1401	
NO _X	tn	49.0772	46.1310	4.8977	
SO _x	tn	30.6998	1.6513	0.0125	
PM	tn	4.3723	0.6380	0.1126	
CO	tn	1.7327	1.7327	4.8977	
CH_4	tn	0.0375	0.0375	32.0259	
N_2O	tn	0.1001	0.0938	0.0688	
NMVOC	tn	1.9266	1.9266	1.8828	

Ταξίδι 6º: Port Hedland - Qingdao

Διαδρομή	Port Hedland
	Qingdao
Αναχώρηση	7/9/2014
Άφιξη	20/9/2014
Απόσταση [nm]	3858
Ταχύτητα [kn]	10.687
RPM	67.5806
Ημέρες ταξιδιού	15.167
Ώρες στο λιμάνι	120
Κατάσταση φόρτωσης	Full Load
Φορτίο [tn]	198558

Πίνακας 48: Χαρακτηριστικά 6^{ου} ταξιδιού

Πίνακας 49: Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του 6^{ου} ταξιδιού

Μηχανή	Μονάδα	Ποσότητα
Κύριες μηχανές	tn	414.1545
Βοηθητικές μηχανές	tn	73.6201
Συνολική κατανάλωση	tn	487.7746

Πίνακας 50: Αέριεα	; εκπομπές κατά ι	τη διάρκεια του	6°υ ταξιδιού
--------------------	-------------------	-----------------	--------------

		Ποσότητα ανά είδος καυσίμου			
Είδος ρύπου	Μονάδα	HFO	MDO	LNG	
CO ₂	tn	1518.930216	1563.805483	1341.380249	
NO _X	tn	38.27079794	35.9733794	3.8192754	
SO _X	tn	23.93997913	1.287725039	0.009755493	
PM	tn	3.409544705	0.497530129	0.087799434	
СО	tn	1.351135742	1.351135742	3.8192754	
CH ₄	tn	0.029266478	0.029266478	24.97406136	
N_2O	tn	0.078043942	0.073166195	0.05365521	
NMVOC	tn	1.502345879	1.502345879	1.468201654	

Ταξίδι 7º: Caofeidian - Yosu

Διαδρομή	Caofeidian Yosu
• /	
Αναχώρηση	25/9/2014
Άφιξη	27/9/2014
Απόσταση [nm]	655
Ταχύτητα [kn]	12.476
RPM	67.8257
Ημέρες ταξιδιού	2.313
Ώρες στο λιμάνι	10
Κατάσταση φόρτωσης	Ballast
Φορτίο [tn]	-

Πίνακας 51: Χαρακτηριστικά 7°υ ταξιδιού

Πίνακας 52: Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του 7^{ου} ταξιδιού

Μηχανή	Μονάδα	Ποσότητα
Κύριες μπχανές	tn	95.8235
Βοηθητικές μηχανές	tn	10.1700
Συνολική κατανάλωση	tn	105.9935

Πίνακας	; 53: Αέ	ριες	εκπο	μπές	κατά	τη	διάρκεια	του	7° ^u	ταξ	ιδιού

		Ποσότητα ανά είδος καυσίμου				
Είδος ρύπου	Μονάδα	HFO	MDO	LNG		
CO ₂	tn	330.0639	339.8153	291.4822		
NO _x	tn	8.3163	7.8170	0.8299		
SO _x	tn	5.2022	0.2798	0.0021		
PM	tn	0.7409	0.1081	0.0191		
СО	tn	0.2936	0.2936	0.8299		
CH ₄	tn	0.0064	0.0064	5.4269		
N_2O	tn	0.0170	0.0159	0.0117		
NMVOC	tn	0.3265	0.3264	0.3190		

Ταξίδι 8º: Yosu – Port Hedland

Διαδρομή	Yosu		
	Port Hedland		
Αναχώρηση	28/9/2014		
Άφιξη	9/10/2014		
Απόσταση [nm]	3490		
Ταχύτητα [kn]	11.952		
RPM	67.8		
Ημέρες ταξιδιού	12.292		
Ώρες στο λιμάνι	72		
Κατάσταση φόρτωσης	Ballast		
Φορτίο [tn]	-		

Πίνακας 54: Χαρακτηριστικά 8°υ ταξιδιού

Πίνακας 55: Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του 8^{ου} ταξιδιού

Μηχανή	Μονάδα	Ποσότητα
Κύριες μπχανές	tn	468.5895275
Βοηθητικές μηχανές	tn	57.744144
Συνολική κατανάλωση	tn	526.3336715

Πίνακας	56: Αέριες	εκπομπές	κατά τη	διάρκεια	του 8°	" ταξιδιού

		Ποσότητα ανά είδος καυσίμου				
Είδος ρύπου	Μονάδα	HFO	MDO	LNG		
CO ₂	tn	1639.0031	1687.4258	1447.4176		
NO _x	tn	41.2961	38.8171	4.1212		
SO _x	tn	25.8325	1.3895	0.0105		
PM	tn	3.6791	0.5369	0.0947		
СО	tn	1.4579	1.4579	4.1212		
CH_4	tn	0.0316	0.0316	26.9483		
N_2O	tn	0.0842	0.0790	0.0579		
NMVOC	tn	1.6211	1.6211	1.5843		

Ταξίδι 9º: Port Hedland - Qingdao

Διαδρομή	Port Hedland
	Qingdao
Αναχώρηση	13/10/2014
Άφιξη	26/10/2014
Απόσταση [nm]	3633
Ταχύτητα [kn]	10.894
RPM	65,1571
Ημέρες ταξιδιού	14.021
Ώρες στο λιμάνι	144
Κατάσταση φόρτωσης	Full Load
Φορτίο [tn]	198558

Πίνακας 57: Χαρακτηριστικά 9°υ ταξιδιού

Πίνακας 58: Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του 9^{ου} ταξιδιού

Μηχανή	Μονάδα	Ποσότητα
Κύριες μηχανές	tn	405.272204
Βοηθητικές μηχανές	tn	70.398288
Συνολική κατανάλωση	tn	475.670492

Πίνακας	59: Αέρ	ριες εκπομι	ιές κατά	τη διάρκ	εια του 9	^{ου} ταξιδιού
---------	----------------	-------------	----------	----------	-----------	------------------------

		Ποσότητα ανά είδος καυσίμου			
Είδος ρύπου	Μονάδα	HFO	MDO	LNG	
CO ₂	tn	1481.2379	1524.9996	1308.0939	
NO _X	tn	37.3211	35.0807	3.7245	
SO _X	tn	23.3459	1.2558	0.0095	
PM	tn	3.3249	0.4852	0.0856	
CO	tn	1.3176	1.3176	3.7245	
CH ₄	tn	0.0285	0.0285	24.3543	
N_2O	tn	0.0761	0.0714	0.0523	
NMVOC	tn	1.4651	1.4651	1.4318	

Ταξίδι 10º: Rizhao - Port Hedland

Διαδρομή	Rizhao
	Port Hedland
Αναχώρηση	4/11/2014
Άφιξη	16/11/2014
Απόσταση [nm]	3650
Ταχύτητα [kn]	12.511
RPM	62,1734
Ημέρες ταξιδιού	12.281
Ώρες στο λιμάνι	408
Κατάσταση φόρτωσης	Ballast
Φορτίο [tn]	-

Πίνακας 60: Χαρακτηριστικά 10^{ου} ταξιδιού

Πίνακας 61: Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του 10^{ου} ταξιδιού

Μηχανή	Μονάδα	Ποσότητα
Κύριες μηχανές	tn	537.0015
Βοηθητικές μηχανές	tn	81.8912
Συνολική κατανάλωση	tn	618.8927

Πίνακας 62: Αέριες	εκπομπές	κατά τη	διάρκεια	του	10 ^{ou}	ταξιδιού

		Ποσότητα ανά είδος καυσίμου			
Είδος ρύπου	Μονάδα	HFO	MDO	LNG	
CO ₂	tn	1927.2319	1984.1701	1701.9550	
NO _x	tn	48.5583	45.6433	4.8459	
SO _x	tn	30.3753	1.6339	0.0124	
PM	tn	4.3261	0.6313	0.1114	
CO	tn	1.7143	1.7143	4.8459	
CH_4	tn	0.0371	0.0371	31.6873	
N_2O	tn	0.0990	0.0928	0.0681	
NMVOC	tn	1.9062	1.9062	1.8629	

Tαξίδι 11º: Port Hedland - Qingdao

Διαδρομή	Port Hedland
	Qingdao
Αναχώρηση	4/12/2014
Άφιξη	17/12/2014
Απόσταση [nm]	3602
Ταχύτητα [kn]	9.683
RPM	54.0066
Ημέρες ταξιδιού	15.625
Ώρες στο λιμάνι	48
Κατάσταση φόρτωσης	Full Load
Φορτίο [tn]	198558

Πίνακας 63: Χαρακτηριστικά 11^{ου} ταξιδιού

Πίνακας 64: Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του 11^{ου} ταξιδιού

Μηχανή	Μονάδα	Ποσότητα
Κύριες μηχανές	tn	317.4384
Βοηθητικές μηχανές	tn	70.4160
Συνολική κατανάλωση	tn	387.8544

Πίνακας 65: Αέριε	ς εκπομπές κατά	τη διάρκεια του	11ου ταξιδιού
-------------------	-----------------	-----------------	---------------

		Ποσότητα ανά είδος καυσίμου			
Είδος ρύπου	Μονάδα	HFO	MDO	LNG	
CO ₂	tn	1207.7787	1243.4613	1066.5997	
NO _X	tn	30.4311	28.6043	3.0369	
SO _X	tn	19.0359	1.0239	0.0078	
PM	tn	2.7111	0.3956	0.0698	
СО	tn	1.0744	1.0744	3.0369	
CH ₄	tn	0.0233	0.0233	19.8581	
N_2O	tn	0.0621	0.0582	0.0427	
NMVOC	tn	1.1946	1.1946	1.1674	

Tαξίδι 12º: Lianyungang - Qingdao

Διαδρομή	Lianyungang Qingdao
Αναχώρηση	21/12/2014
Άφιξη	22/12/2014
Απόσταση [nm]	75
Ταχύτητα [kn]	13.043
RPM	68
Ημέρες ταξιδιού	0.365
Ώρες στο λιμάνι	36
Κατάσταση φόρτωσης	Full Load
Φορτίο [tn]	198558

Πίνακας 66: Χαρακτηριστικά 12°υ ταξιδιού

Πίνακας 67: Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του 12^{ου} ταξιδιού

Μηχανή	Μονάδα	Ποσότητα
Κύριες μηχανές	tn	11.9927
Βοηθητικές μηχανές	tn	3.6271
Συνολική κατανάλωση	tn	15.6198

Πίνακας θ	5 8: Αέριες	; εκπομπές	κατά τη	διάρκεια	του 12ου	ταξιδιού
-----------	--------------------	------------	---------	----------	----------	----------

		Ποσότητα ανά είδος καυσίμου		
Είδος ρύπου	Μονάδα	HFO	MDO	LNG
CO ₂	tn	48.6400	50.0770	42.9544
NO _X	tn	1.2255	1.1520	0.1223
SO _x	tn	0.7666	0.0412	0.0003
PM	tn	0.1092	0.0159	0.0028
CO	tn	0.0433	0.0433	0.1223
CH_4	tn	0.0009	0.0009	0.7997
N_2O	tn	0.0025	0.0023	0.0017
NMVOC	tn	0.0481	0.0481	0.0470

Tαξίδι 13º: Qingdao - Port Hedliand

Διαδρομή	Qingdao
	Port Hedland
Αναχώρηση	24/12/2014
Άφιξη	5/1/2015
Απόσταση [nm]	3652
Ταχύτητα [kn]	12.093
RPM	69.0967
Ημέρες ταξιδιού	12.708
Ώρες στο λιμάνι	192
Κατάσταση φόρτωσης	Ballast
Φορτίο [tn]	-

Πίνακας 69: Χαρακτηριστικά 13^{ου} ταξιδιού

Πίνακας 70: Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του 13^{ου} ταξιδιού

Μηχανή	Μονάδα	Ποσότητα
Κύριες μηχανές	tn	502.1891
Βοηθητικές μηχανές	tn	68.2055
Συνολική κατανάλωση	tn	570.3946

Πίνακας 71: Α	έριες εκπο	ιπές κατά τη	διάρκεια το	ου 13 ^{ου} τα	ξιδιού
---------------	------------	--------------	-------------	------------------------	--------

		Ποσότητα ανά είδος καυσίμου		
Είδος ρύπου	Μονάδα	HFO	MDO	LNG
CO ₂	tn	1776.2086	1828.6849	1568.5850
NO _x	tn	44.7532	42.0666	4.4662
SO _x	tn	27.9950	1.5058	0.0114
PM	tn	3.9871	0.5818	0.1027
CO	tn	1.5800	1.5800	4.4662
CH_4	tn	0.0342	0.0342	29.2042
N_2O	tn	0.0913	0.0856	0.0627
NMVOC	tn	1.7568	1.7568	1.7169

Tαξίδι 14º: Port Hedland - Qingdao

Διαδρομή	Port Hedland
	Qingdao
Αναχώρηση	13/1/2015
Άφιξη	27/1/2015
Απόσταση [nm]	3570
Ταχύτητα [kn]	10.818
RPM	67.9295
Ημέρες ταξιδιού	14.875
Ώρες στο λιμάνι	144
Κατάσταση φόρτωσης	Full Load
Φορτίο [tn]	198558

Πίνακας 72: Χαρακτηριστικά 14^{ου} ταξιδιού

Πίνακας 73: Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του 14^{ου} ταξιδιού

Μηχανή	Μονάδα	Ποσότητα
Κύριες μηχανές	tn	421.2413
Βοηθητικές μηχανές	tn	74.0880
Συνολική κατανάλωση	tn	495.3293

Πίνακας 74: Αέριε	ς εκπομπές κ	κατά τη διάρκεια	του 14°υ ταξιδιού
--------------------------	--------------	------------------	-------------------

		Ποσότητα ανά είδος καυσίμου		
Είδος ρύπου	Μονάδα	HFO	MDO	LNG
CO ₂	tn	1542.4555	1588.02584	1362.1557
NO _X	tn	38.8635	36.5305	3.8784
SOx	tn	24.3108	1.3077	0.0099
PM	tn	3.4624	0.5052	0.0892
СО	tn	1.3721	1.3721	3.8784
CH_4	tn	0.0297	0.0297	25.3609
N_2O	tn	0.0793	0.0743	0.0545
NMVOC	tn	1.5256	1.5256	1.4909
	1			

Ταξίδι 15º: Jingtang - Port Hedland

Διαδρομή	Jingtang Port Hedland
Αναχώρηση	3/2/2015
Άφιξη	16/2/2015
Απόσταση [nm]	3551
Ταχύτητα [kn]	12.460
RPM	62.2484
Ημέρες ταξιδιού	13.000
Ώρες στο λιμάνι	96
Κατάσταση φόρτωσης	Ballast
Φορτίο [tn]	-

Πίνακας 75: Χαρακτηριστικά 15^{ου} ταξιδιού

Πίνακας 76: Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του 15^{ου} ταξιδιού

Μηχανή	Μονάδα	Ποσότητα
Κύριες μηχανές	tn	561.8228
Βοηθητικές μηχανές	tn	62.5320
Συνολική κατανάλωση	tn	624.3548

Πίνακας 77: Αέρ	ριες εκπομπές	κατά τη διά	ρκεια του 15	ου ταξιδιού
-----------------	---------------	-------------	--------------	-------------

		Ποσότητα ανά είδος καυσίμου				
Είδος ρύπου	Μονάδα	HFO	MDO	LNG		
CO ₂	tn	1944.2410	2001.6816	1716.9758		
NO _X	tn	48.9869	46.0462	4.8887		
SO _x	tn	30.6433	1.6483	0.0125		
PM	tn	4.3642	0.6368	0.1124		
CO	tn	1.7295	1.7295	4.8887		
CH_4	tn	0.0375	0.0375	31.9670		
N_2O	tn	0.0999	0.0937	0.0687		
NMVOC	tn	1.9230	1.9230	1.8793		

Ταξίδι 16º: Port Hedland - Tianjin

Διαδρομή	Port Hedland
	Tianjin
Αναχώρηση	21/2/2015
Άφιξη	7/3/2015
Απόσταση [nm]	3634
Ταχύτητα [kn]	10.736
RPM	67.8938
Ημέρες ταξιδιού	14.229
Ώρες στο λιμάνι	36
Κατάσταση φόρτωσης	Full Load
Φορτίο [tn]	198558

Πίνακας 78: Χαρακτηριστικά 16^{ου} ταξιδιού

Πίνακας 79: Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του 16^{ου} ταξιδιού

Μηχανή	Μονάδα	Ποσότητα
Κύριες μηχανές	tn	393.7050
Βοηθητικές μηχανές	tn	63.5217
Συνολική κατανάλωση	tn	457.2267

Πίνακα	ις 80:	Αέριες	εκπομπές	κατά τη	διάρκεια	του	16°°	ταξιδιού
--------	--------	--------	----------	---------	----------	-----	------	----------

		Ποσότητα ανά είδος καυσίμου				
Είδος ρύπου	Μονάδα	HFO	MDO	LNG		
CO ₂	tn	1423.8039	1465.8688	1257.3734		
NO _x	tn	35.8740	33.7205	3.5801		
SO _x	tn	22.4407	1.2071	0.0091		
PM	tn	3.1960	0.4664	0.0823		
CO	tn	1.2665	1.2665	3.5801		
CH_4	tn	0.0274	0.0274	23.4100		
N_2O	tn	0.0732	0.0686	0.0503		
NMVOC	tn	1.4083	1.4083	1.3763		

Tαξίδι 17º: Qingdao - Xingang (Tianjin)

Διαδρομή	Qingdao
	Xingang (Tianjin)
Αναχώρηση	9/3/2015
Άφιξη	11/3/2015
Απόσταση [nm]	475
Ταχύτητα [kn]	10.556
RPM	67.9022
Ημέρες ταξιδιού	2.000
Ώρες στο λιμάνι	72
Κατάσταση φόρτωσης	Full Load
Φορτίο [tn]	198558

Πίνακας 81: Χαρακτηριστικά 17^{ου} ταξιδιού

Πίνακας 82: Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του 17^{ου} ταξιδιού

Μηχανή	Μονάδα	Ποσότητα
Κύριες μηχανές	tn	49.7505
Βοηθητικές μηχανές	tn	13.2840
Συνολική κατανάλωση	tn	63.0345

Πίνακας 83: Αέριες	εκπομπές	κατά τη	διάρκεια	του 1	7 ^{ου} ταξιδιού

		Ποσότητα ανά είδος καυσίμου				
Είδος ρύπου	Μονάδα	HFO	MDO	LNG		
CO ₂	tn	196.2894	202.0886	173.3449		
NO _x	tn	4.9457	4.6488	0.4936		
SO _X	tn	3.0937	0.1664	0.0013		
PM	tn	0.4406	0.0643	0.0113		
СО	tn	0.1746	0.1746	0.4936		
CH_4	tn	0.0038	0.0038	3.2274		
N_2O	tn	0.0101	0.0095	0.0069		
NMVOC	tn	0.1941	0.1941	0.1897		

Ταξίδι 18º: Xingang (Tianjin) - Port Hedland

Διαδρομή	Xingang (Tianjin) Port Hedland
	Torcricularia
Αναχώρηση	15/3/2015
Άφιξη	28/3/2015
Απόσταση [nm]	3881
Ταχύτητα [kn]	12.109
RPM	62.8154
Ημέρες ταξιδιού	13.479
Ώρες στο λιμάνι	456
Κατάσταση φόρτωσης	Ballast
Φορτίο [tn]	-

Πίνακας 84: Χαρακτηριστικά 18^{ου} ταξιδιού

Πίνακας 85: Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του 18^{ου} ταξιδιού

Μηχανή	Μονάδα	Ποσότητα
Κύριες μηχανές	tn	534.8608
Βοηθητικές μηχανές	tn	90.5221
Συνολική κατανάλωση	tn	625.3829

Πίνακας 86: Αέριες	εκπομπές	κατά τη	διάρκεια	του	18ºण	ταξιδιού

		Ποσότητα ανά είδος καυσίμου		
Είδος ρύπου	Μονάδα	HFO	MDO	LNG
CO ₂	tn	1947.4424	2004.9776	1719.8030
NO _x	tn	49.0675	46.1220	4.8967
SO _x	tn	30.6938	1.6510	0.0125
PM	tn	4.3714	0.6379	0.1126
СО	tn	1.7323	1.7323	4.8967
CH ₄	tn	0.0375	0.0375	32.0196
N_2O	tn	0.1001	0.0938	0.0688
NMVOC	tn	1.9262	1.9262	1.8824

Tαξίδι 19º: Port Hedland - Qingdao

Διαδρομή	Port Hedland
	Qingdao
Αναχώρηση	19/4/2015
Άφιξη	3/5/2015
Απόσταση [nm]	3141
Ταχύτητα [kn]	10.944
RPM	67.8998
Ημέρες ταξιδιού	12.083
Ώρες στο λιμάνι	30
Κατάσταση φόρτωσης	Full Load
Φορτίο [tn]	198558

Πίνακας 87: Χαρακτηριστικά 19^{ου} ταξιδιού

Πίνακας 88: Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του 19^{ου} ταξιδιού

Μηχανή	Μονάδα	Ποσότητα
Κύριες μηχανές	tn	353.5895
Βοηθητικές μηχανές	tn	53.8203
Συνολική κατανάλωση	tn	407.40978

Πίνακας	89: Αέρι	ες εκπομπές	κατά τη	διάρκεια	του 19ου	ταξιδιού
---------	----------	-------------	---------	----------	----------	----------

		Ποσότη		
		noooun	ια ανα είδος κ	μοσιμου
Είδος ρύπου	Μονάδα	HFO	MDO	LNG
CO ₂	tn	1268.6741	1306.1558	1120.3769
NOx	tn	31.9654	30.0465	3.1900
SO _X	tn	19.9957	1.0756	0.0081
PM	tn	2.8478	0.4156	0.0733
СО	tn	1.1285	1.1285	3.1900
CH_4	tn	0.0244	0.0244	20.8594
N_2O	tn	0.0652	0.0611	0.0448
NMVOC	tn	1.2548	1.2548	1.2263
	1			

Ταξίδι 20º: Zhoushan - Taicang

Διαδρομή	Zhoushan
	Taicang
Αναχώρηση	4/5/2015
Άφιξη	5/5/2015
Απόσταση [nm]	109
Ταχύτητα [kn]	12.475
RPM	68
Ημέρες ταξιδιού	0.489
Ώρες στο λιμάνι	48
Κατάσταση φόρτωσης	Full Load
Φορτίο [tn]	198558

Πίνακας 90: Χαρακτηριστικά 20°υ ταξιδιού

Πίνακας 91: Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του 20" ταξιδιού

Μηχανή	Μονάδα	Ποσότητα
Κύριες μηχανές	tn	15.9675
Βοηθητικές μηχανές	tn	5.0311
Συνολική κατανάλωση	tn	20.9986

Πίνακας 92: Αέριες	εκπομπές	κατά τη	διάρκεια	του 20°	" ταξιδιού

		Ποσότητα ανά είδος καυσίμου		
Είδος ρύπου	Μονάδα	HFO	MDO	LNG
CO ₂	tn	65.3895	67.3214	57.7460
NO _X	tn	1.6475	1.5486	0.1644
SO _x	tn	1.0306	0.0554	0.0004
PM	tn	0.1468	0.0214	0.0038
CO	tn	0.0582	0.0582	0.1644
CH_4	tn	0.0013	0.0013	1.0751
N_2O	tn	0.0034	0.0031	0.0023
NMVOC	tn	0.0647	0.0647	0.0632

Ταξίδι 21º: Taicang - Port Hedland

Διαδρομή	Taicang
	Port Hedland
Αναχώρηση	7/5/2015
Άφιξη	19/5/2015
Απόσταση [nm]	3326
Ταχύτητα [kn]	12.575
RPM	67.9395
Ημέρες ταξιδιού	11.146
Ώρες στο λιμάνι	48
Κατάσταση φόρτωσης	Ballast
Φορτίο [tn]	-

Πίνακας 93: Χαρακτηριστικά 21°υ ταξιδιού

Πίνακας 94: Υπολογισμός κατανάλωσης καυσίμου μηχανών κατά τη διάρκεια του 21^{ου} ταξιδιού

Μηχανή	Μονάδα	Ποσότητα
Κύριες μηχανές	tn	494.3552
Βοηθητικές μηχανές	tn	51.0663
Συνολική κατανάλωση	tn	545.4215

Πίνακας 95: Αέριες εκπομ	πές κατά τη διά	ρκεια του 21ºº ταξιδιού
--------------------------	-----------------	-------------------------

		Ποσότητα ανά είδος καυσίμου			
Είδος ρύπου	Μονάδα	HFO	MDO	LNG	
CO ₂	tn	1698.4424	1748.6212	1499.9090	
NO _x	tn	42.7938	40.2248	4.2706	
SO _x	tn	26.7693	1.4399	0.0109	
PM	tn	3.8125	0.5563	0.0982	
CO	tn	1.5108	1.5108	4.2706	
CH_4	tn	0.0327	0.0327	27.9256	
N_2O	tn	0.0873	0.0818	0.0600	
NMVOC	tn	1.6799	1.6799	1.6417	

Όπως έχει αναφερθεί, ο υπολογισμός των εκπομπών αέριων ρύπων κατά τη λειτουργία του πλοίου έγινε με βάση την εκτιμώμενη κατανάλωση καυσίμου των κύριων και βοηθητικών μηχανών. Η κατανάλωση καυσίμου προκύπτει μέσα από υπολογιστικές σχέσεις που περιγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Επισημαίνεται ότι πραγματοποιήθηκε σύγκριση των υπολογισθέντων καταναλώσεων καυσίμου με τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές που έχουν καταγραφεί από την πλοιοκτήτρια εταιρία.

Στο σχήμα που ακολουθεί αποτυπώνεται n σύγκριση των εκτιμώμενων και πραγματικών τιμών κατανάλωσης καυσίμου της κύριας μηχανής του υπό μελέτη πλοίου για κάθε ταξίδι που πραγματοποίησε. Διαπιστώνεται ότι n απόκλιση μεταξύ των δύο τιμών κινείται εντός λογικών ορίων με δεδομένο το γεγονός ότι n μέθοδος ανάλυσης που χρησιμοποιείται δεν λαμβάνει υπόψη ένα πλήθος παραγόντων που διαφοροποιούνται σε κάθε ταξίδι. Τέτοιοι παράγοντες είναι οι καιρικές συνθήκες του ταξιδιού, οι θαλάσσιοι κυματισμοί, n κατάσταση της θάλασσας, n ρύπανση της γάστρας και του πηδαλίου κ.λπ.



Διάγραμμα 17: Σύγκριση εκτιμώμενης και πραγματικής κατανάλωσης καυσίμου κύριας μηχανής του υπό μελέτη πλοίου

Με βάση τις προαναφερθείσες τιμές των καταναλώσεων των κύριων και βοηθητικών μηχανών έγινε η εκτίμηση των εκπομπών αέριων ρύπων του πλοίου κατά τη φάση της λειτουργίας του.

Στα σχήματα που ακολουθούν δίνεται μια συνολική εικόνα των εκπομπών σε κάθε ταξίδι. Οι εκάστοτε εκπομπές ρύπων παρουσιάζονται για τα τρία διαφορετικά είδη καυσίμων που συμπεριλήφθηκαν στη μελέτη. Γίνεται αντιληπτό ότι κάθε καύσιμο, ανάλογα με τη σύστασή του, συμβάλει με διαφορετικό τρόπο στους ρύπους που παράγει το πλοίο κατά τη λειτουργία του.







Διάγραμμα 19: Εκπομπές ΝΟχ σε κάθε ταξίδι



Διάγραμμα 20: Εκπομπές SOx σε κάθε ταξίδι



Διάγραμμα 21: Εκπομπές ΡΜ σε κάθε ταξίδι



Διάγραμμα 22: Εκπομπές CO σε κάθε ταξίδι



Διάγραμμα 23: Εκπομπές CH4 σε κάθε ταξίδι



Διάγραμμα 24: Εκπομπές N₂O σε κάθε ταξίδι



Διάγραμμα 25: Εκπομπές NMVOC σε κάθε ταξίδι

7.4.2 Συνολικές εκπομπές αέριων ρύπων κατά τη λειτουργία ενός έτους

Με βάση τα δεδομένα που αξιοποιήθηκαν για την ανάλυση, το πλοίο κάλυψε 63105 ναυτικά μίλια κατά τη διάρκεια ενός έτους λειτουργίας με μέση ταχύτητα 11.39 κόμβων (μέση τιμή των ταχυτήτων των επιμέρους ταξιδιών). Στο διάστημα ενός χρόνου που μελετήθηκε, το πλοίο ταξίδευε συνολικά περίπου 231 ημέρες ενώ 117 ημέρες βρισκόταν σε λιμάνι. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του υπολογιστικού εργαλείου η κατανάλωση καυσίμου των κύριων μηχανών μέσα στο προαναφερθέν χρονικό διάστημα ανέρχεται στους 8033 τόνους ενώ η αντίστοιχη των βοηθητικών μηχανών είναι 1199 τόνοι. Συνολικά, εκτιμάται ότι το πλοίο κατανάλωσε 9232 τόνους καυσίμου.

	Λειτουργία ενός έτους
Απόσταση [nm]	63105
Ταχύτητα [kn]	11.39
Ημέρες ταξιδιού	230.85
Ώρες στο λιμάνι	116.65

Πίνακας 96: Χαρακτηριστικά ενός έτους λειτουργίας

Πίνακας 97: Κατανάλωση καυσίμου κατά τη διάρκεια ενός έτους λειτουργίας

Μηχανή	Μονάδα	Ποσότητα
Κύριες μηχανές	tn	8032.943265
Βοηθητικές μηχανές	tn	1198.832112
Συνολική κατανάλωση	tn	9231.775377

Πίνακας 98: Αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια ενός έτους λειτουργίας

-

		Ποσότητα ανά είδος καυσίμου			
Είδος ρύπου	Μονάδα	HFO	MDO	LNG	
CO ₂	tn	28747.749	29597.072	25387.382	
NO _X	tn	724.325	680.843	72.285	
SOx	tn	453.096	24.372	0.185	
PM	tn	64.530	9.416	1.662	
CO	tn	25.572	25.572	72.285	
CH_4	tn	0.554	0.554	472.667	
N_2O	tn	1.477	1.385	1.015	
NMVOC	tn	28.434	28.434	27.788	



Διάγραμμα 26: Αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια ενός έτους λειτουργίας

7.5 Συνολικές αέριες εκπομπές της μηχανολογικής εγκατάστασης

Συγκρίνοντας τις τιμές των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης με αντίστοιχες που εμπεριέχονται στη διεθνή βιβλιογραφία ή σε παρόμοιες έρευνες συμπεραίνεται ότι οι υπολογισμοί του προγράμματος κινούνται εντός λογικών ορίων.

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι ο ρύπος με τις μεγαλύτερες ποσότητες αέριων εκπομπών σε όλα τα στάδια της μηχανολογικής εγκατάστασης. Όπως είναι αναμενόμενο, η χρήση LNG μειώνει τις συγκεκριμένες εκπομπές χωρίς, ωστόσο, οι ποσότητες να παρουσιάζουν ιδιαίτερες αποκλίσεις. Συγκεκριμένα, κατά τη λειτουργία ενός έτους του πλοίου οι εκπομπές CO₂ ανέρχονται στους 29597 τόνους για χρήση θαλάσσιου πετρελαίου ντίζελ (MDO) και στους 25387 τόνους για χρήση υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG). Παρατηρείται, ακόμη, ότι στο σύνολο των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα του σεναρίου που εξετάστηκε, το στάδιο της λειτουργίας ενός έτους συμβάλει σε ποσοστό 86% ενώ ακολουθούν οι δοκιμές σε εργοστασιακό περιβάλλον σε ποσοστό 8%.

Η μείωση λόγω χρήσης LNG γίνεται ιδιαίτερα αισθητή στις περιπτώσεις εκπομπών NO_X και SO_X και PM. Οι συγκεκριμένες εκπομπές εμφανίζονται εξαιρετικά αυξημένες στη χρήση βαρέος καυσίμου (HFO) ενώ μειώνονται σημαντικά όταν οι μηχανές του πλοίου λειτουργούν με MDO. Ειδικά για την περίπτωση των οξειδίων του θείου, η χρήση καυσίμου LNG. σχεδόν μηδενίζει τις ποσότητες εκπομπών. Συγκεκριμένα, η μελέτη του κύκλου της μηχανολογικής εγκατάστασης που περιλάμβανε την κατασκευή, τις δοκιμές και τη λειτουργία ενός έτους ανέδειξε ότι οι συνολικές εκπομπές SO_X για καύσιμο LNG δεν ξεπερνούν τους 0.21 τόνους.

Αντίθετα, η ανάλυση του υποσυστήματος της μηχανολογικής εγκατάστασης κατέδειξε ότι οι εκπομπές CH4 παρουσιάζουν αξιοσημείωτη αύξηση για την περίπτωση χρήσης υγροποιημένου φυσικού αερίου. Το γεγονός αυτό είναι απόλυτα λογικό εφόσον το LNG είναι ένα καύσιμο με εξαιρετικά υψηλή περιεκτικότητα σε μεθάνιο· περιεκτικότητα που ανέρχεται στο 94-95% της συνολικής σύστασής του. Ακόμη, προκύπτει ότι για χρήση βαρέος καυσίμου καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής της μηχανολογικής εγκατάστασης, το στάδιο κατά το οποίο παράγονται οι μεγαλύτερες ποσότητες CH₄ είναι αυτό της κατασκευής των μηχανών, σε ποσοστό 78%, ενώ ακολουθεί το στάδιο της λειτουργίας σε ποσοστό 20%.

Τέλος, οι εκπομπές των υποξειδίων του αζώτου και των μη μεθανικών πτητικών οργανικών ενώσεων κινούνται σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα σε όλα τα στάδια. Οι εκπομπές NMVOC κατά τη λειτουργία ενός έτους ανέρχονται στους 30 τόνους, ενώ οι αντίστοιχες εκπομπές N2O δεν ξεπερνούν τον 1.5 τόνο. Περαιτέρω μείωση εμφανίζεται για την περίπτωση χρήσης καυσίμου LNG χωρίς, ωστόσο, να παρουσιάζονται μεγάλες αποκλίσεις.

Στους πίνακες που ακολουθούν παρατίθενται συγκεντρωτικά οι ποσότητες αέριων ρύπων που παράγονται στα τέσσερα στάδια της μελέτης της μηχανολογικής εγκατάστασης. Στα σχήματα αποτυπώνεται η ποσοστιαία συμβολή κάθε σταδίου στις εκπομπές με την παραδοχή ότι ως κύριο καύσιμο χρησιμοποιείται το HFO.

Εκπομπές CO₂ [tn]					
Καύσιμο	Κατασκευή μηχανών	Λειτουργία ενός έτους			
HFO	1735.5604	2677.2497	211.1860	28747.7485	
MDO	-	2756.3464	217.4253	29597.0719	
LNG	-	2364.3022	186.5002	25387.3823	

Πίνακας 99: Συνολικές εκπομπές CO2 της μηχανολογικής εγκατάστασης



Σχήμα 18: Εκπομπές CO₂ ανά στάδιο της μηχανολογικής εγκατάστασης

Εκπομπές NO _x [tn]						
Καύσιμο Κατασκευή Δοκιμές Δοκιμές Λειτου μπχανών (εργοστάσιο) (θάλασσα) ενός έ						
HFO	5.5242	67.4558	5.3210	724.3251		
MDO	-	63.4063	5.0016	680.8434		
LNG	-	6.7318	0.5310	72.2848		

Πίνακας 100: Συνολικές εκπομπές ΝΟχ της μηχανολογικής εγκατάστασης



Σχήμα 19: Εκπομπές NO_X ανά στάδιο της μηχανολογικής εγκατάστασης

Τίνακας 101: Συνολικέα	ς εκπομπές SOx της	μηχανολογικής	εγκατάστασης
-------------------------------	--------------------	---------------	--------------

Εκπομπές SO _x [tn]						
Καύσιμο	Κατασκευή μηχανών	Δοκιμές (θάλασσα)	Λειτουργία ενός έτους			
HFO	0.5933	42.1963	3.3285	453.0955		
MDO	-	2.2697	0.1790	24.3719		
LNG	-	0.0172	0.0014	0.1846		



Σχήμα 20: Εκπομπές SOx ανά στάδιο της μηχανολογικής εγκατάστασης

Εκπομπές PM [tn]						
Καύσιμο	Λειτουργία ενός έτους					
HFO	11.3962	6.0096	0.4740	64.5301		
MDO	-	0.8769	0.0692	9.4164		
LNG	-	0.1548	0.0122	1.6617		

Πίνακας 102: Συνολικές εκπομπές ΡΜ της μηχανολογικής εγκατάστασης



Σχήμα 21: Εκπομπές ΡΜ ανά στάδιο της μηχανολογικής εγκατάστασης

Πίνακας	103:	Συνολικές	εκπομπές	CO	της	μηχανολ	ογικής	εγκατά	στασης
---------	------	-----------	----------	----	-----	---------	--------	--------	--------

Εκπομπές CO [tn]						
Καύσιμο	Καύσιμο Κατασκευή Δοκιμές Δοκιμές Λειτα μηχανών (εργοστάσιο) (θάλασσα) ενός					
HFO	3.7442	2.3815	0.1879	25.5720		
MDO	-	2.3815	0.1879	25.5720		
LNG	-	6.7318	0.5310	72.2848		



Σχήμα 22: Εκπομπές CO ανά στάδιο της μηχανολογικής εγκατάστασης

Εκπομπές CH₄ [tn]						
Καύσιμο Κατασκευή Δοκιμές Δοκιμές Λει μηχανών (εργοστάσιο) (θάλασσα) ενά						
HFO	2.1278	0.0516	0.0041	0.5539		
MDO	-	0.0516	0.0041	0.5539		
LNG	-	44.0190	3.4723	472.6669		

|--|



Σχήμα 23: Εκπομπές CH₄ ανά στάδιο της μηχανολογικής εγκατάστασης

Πίνακας 105:	Συνολικές εκπομ	πές Ν2Ο της μι	πχανολογικής ε	τγκατάστασης
--------------	-----------------	----------------	----------------	--------------

Εκπομπές Ν₂Ο [tn]						
Καύσιμο	Κατασκευή μηχανών	Δοκιμές (εργοστάσιο)	Δοκιμές (θάλασσα)	Λειτουργία ενός έτους		
HFO	-	0.1376	0.0109	1.4771		
MDO	-	0.1290	0.0102	1.3848		
LNG	-	0.0946	0.0075	1.0155		



Σχήμα 24: Εκπομπές Ν₂Ο ανά στάδιο της μηχανολογικής εγκατάστασης

Εκπομπές NMVOC [tn]						
Καύσιμο	Κατασκευή μηχανών	Δοκιμές (εργοστάσιο)	Δοκιμές (θάλασσα)	Λειτουργία ενός έτους		
HFO	0.3683	2.6480	0.2089	28.4339		
MDO	-	2.6480	0.2089	28.4339		
LNG	-	2.5878	0.2041	27.7876		

Πίνακας 106: Συνολικές εκπομπές ΝΜVOC της μηχανολογικής εγκατάστασης



Σχήμα 25: Εκπομπές Ν2Ο ανά στάδιο της μηχανολογικής εγκατάστασης

7.6 Ανάλυση των αποτελεσμάτων με βάση τους ισχύοντες κανονισμούς

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο σημείο της παρούσας εργασίας, προκειμένου να υπάρξει δραστική μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων από την ναυτιλιακή δραστηριότητα, μια σειρά κανονισμών έχουν υιοθετηθεί από τον οργανισμό ΙΜΟ και βρίσκονται σε εφαρμογή. Οι συγκεκριμένοι κανονισμοί επικεντρώνονται στη θέσπιση ορίων εκπομπών ρύπων από τη λειτουργία των πλοίων. Τέτοια όρια αφορούν, μεταξύ άλλων, στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (δείκτης EEDI), οξειδίων του αζώτου (Tier I, II, III) καθώς και στις εκπομπές οξειδίων του θείου σε Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών (ECA).

Παρακάτω πραγματοποιείται μια προσπάθεια ανάλυσης των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με βάση τους ανωτέρω κανονισμούς.

7.6.1 Εκπομπές CO2 ανά τονομίλι

Για τον αποτελεσματικότερο έλεγχο των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη λειτουργία των πλοίων, η Επιτροπή Προστασίας Θαλασσίου Περιβάλλοντος (Marine

Environment Protection Committee, MEPC) του IMO ανέπτυξε τον Δείκτη Σχεδίασης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (Energy Efficiency Design Index, EEDI). Ο συγκεκριμένος δείκτης αποτελεί ένα μαθηματικό τύπο, ο οποίος εκφράζει την αναλογία μεταξύ του κόστους (δηλαδή εκπομπή CO₂) και του κέρδους που παράγεται, το οποίο εκφράζεται ως ικανότητα μεταφοράς αγαθών, από τη λειτουργία του πλοίου (Παπακώστας, 2011). Η μονάδα του EEDI είναι "γραμμάρια CO₂ ανά χωρητικότητα (τόνοι) – μίλι" και εκφράζει την παραγόμενη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα ανά μεταφορικό έργο.



$$EEDI = \frac{CO_2 \ emissions}{Transport \ work}$$

Διάγραμμα 27: Γραμμή αναφοράς δείκτη ΕΕDI (DNV Bulk Carrier Magazine, 2012)

Ακόμη, σύμφωνα με τον Κανονισμό (ΕΕ) 2015/757 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 29^{nc} Απριλίου 2015 "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" (L 123/55/19.5.2015), η παρακολούθηση των εκπομπών CO₂ για κάθε πλοίο πρέπει να γίνεται σύμφωνα με δείκτη που καθορίζεται ως το πηλίκο των αέριων εκπομπών προς το μεταφορικό έργο ή τη διανυθείσα απόσταση.

Στο σχήμα που ακολουθεί εμφανίζονται οι εκπομπές CO₂ ανά τονομίλι του υπό μελέτη πλοίου κατά τη διάρκεια των ταξιδιών στα οποία υπήρχε μεταφερόμενο φορτίο. Οι εκπομπές CO₂ ανά τονομίλι παρουσιάζονται για τις περιπτώσεις χρήσης τριών διαφορετικών καυσίμων: HFO, MDO και LNG.

Στο ίδιο σχήμα εμφανίζονται τα επίπεδα τιμών των εκπομπών CO₂ ανά τονομίλι για τα έτη 2010, 2011, 2012 και 2014 για περιπτώσεις πλοίων Bulk Carrier Capesize όπως αυτό που μελετάται στην παρούσα εργασία. Οι συγκεκριμένες τιμές περιέχονται σε πρόσφατη μελέτη του IMO (IMO, 2015). Ακόμη, η πορτοκαλί γραμμή το ισχύον όριο για πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην μεγέθους Capesize (IMO, 2015). Τέλος, με γαλάζιο χρώμα φαίνεται η περιοχή τιμών εκπομπών CO₂ ανά τονομίλι στην οποία λειτουργούν



οι μηχανές της εταιρίας ΜΑΝ που προορίζονται για πλοία Bulk Carrier αντίστοιχου μεγέθους (MAN, 2014).

Διάγραμμα 28: Εκπομπές CO2 ανά τονομίλι του υπό μελέτη πλοίου

Όπως διαπιστώνεται από το σχήμα, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά τονομίλι όπως προέκυψαν από την μελέτη του πλοίου κινούνται εντός των ορίων που θέτει ο οργανισμός ΙΜΟ. Ακόμη, φαίνεται ότι τα αποτελέσματα του υπό μελέτη πλοίου βρίσκονται σε ακόμη χαμηλότερα επίπεδα από τον μέσο όρο των εκπομπών CO₂ ανά μεταφορικό έργο για το έτος 2014.

Παρατηρείται, ωστόσο, το ξεπέρασμα των συγκεκριμένων ορίων στην περίπτωση δύο ταξιδιών (Lianyungang-Qingdao και Zhoushan-Taicang). Τα συγκεκριμένα ταξίδια αφορούν σε διαδρομές πολύ μικρών αποστάσεων, 75 και 109 μιλίων αντίστοιχα, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει στην υπόθεση ότι το πλοίο δεν ταξιδεύει σε κατάσταση Full-Load (παραδοχή που, ελλείψει πραγματικών στοιχείων, έχει γίνει για τα υπόλοιπα ταξίδια). Επιπροσθέτως, για τα ταξίδια του υπό μελέτη πλοίου πραγματοποιήθηκε Ανάλυση Εύρεσης Έκτοπων (Outlier Analysis) με βάση την οποία οι δύο προαναφερθείσες διαδρομές εξαιρούνται της μελέτης ως ακραία έκτοπα (Παράρτημα Α΄).

Όπως είναι αναμενόμενο, η χρήση καυσίμου LNG μειώνει αισθητά τις ποσότητες των παραγόμενων διοξειδίων του άνθρακα σε επίπεδα χαμηλότερα των 2 γραμμαρίων CO₂ ανά τονομίλι.

7.6.2 Εκπομπές NO_X ανά κιλοβατώρα

Στο παράρτημα VI της Διεθνούς Σύμβασης για την Πρόληψη της Ρύπανσης από Πλοία (MARPOL) περιγράφονται τρεις βαθμίδες απαιτήσεων (Tier) για τα όρια των εκπομπών οξειδίων του αζώτου (Πίνακας 4) στις Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών Αζώτου (Nitrous oxide Emission Control Areas, NECAs) αλλά και εν γένει σε παγκόσμιο επίπεδο (Πίνακας 3). Με βάση τις συγκεκριμένες βαθμίδες, τα όρια των εκπομπών ΝΟ_χ καθορίζονται σε γραμμάρια εκπομπών ανά κιλοβατώρα και βρίσκονται σε άμεση εξάρτηση με τις στροφές λειτουργίας της μηχανής του πλοίου.

Η πρώτη βαθμίδα (*Tier I*) τέθηκε σε εφαρμογή την 1ⁿ Ιανουαρίου 2000, είχε παγκόσμια ισχύ και προέβλεπε όριο 17 γραμμαρίων NO_x ανά κιλοβατώρα για τις αργόστροφες μηχανές (n < 130 rpm). Η δεύτερη βαθμίδα (*Tier II*) βρίσκεται σε εφαρμογή σε παγκόσμιο επίπεδο από την 1ⁿ Ιανουαρίου 2011 και συμπεριλαμβάνει μείωση των ορίων κατά 20% σε σχέση με την πρώτη. Αυτό σημαίνει ότι για τις αργόστροφες μηχανές το όριο τίθεται στα 14.4 γραμμάρια NO_x ανά κιλοβατώρα. Τέλος, η τρίτη βαθμίδα (*Tier III*) αναμένεται να τεθεί σε ισχύ την 1ⁿ Ιανουαρίου 2016 και αφορά στις Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών Αζώτου. Σύμφωνα με αυτή προβλέπεται περαιτέρω μείωση των επιτρεπόμενων ορίων κατά 80% σε σχέση με την πρώτη βαθμίδα. Αυτή η μείωση μεταφράζεται σε 3.4 γραμμάρια οξειδίων του αζώτου ανά κιλοβατώρα για την περίπτωση των αργόστροφων μηχανών ντίζελ.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται τα όρια εκπομπών NO_X με βάση τις τρεις βαθμίδες που συμπεριλαμβάνονται στο παράρτημα VI της MARPOL.



Διάγραμμα 29: Όρια εκπομπών NO_x (IMO, 2014)

Η μπχανή που βρίσκεται εγκατεστημένη στο υπό μελέτη πλοίο είναι αργόστροφη μπχανή ντίζελ με μέγιστη συνεχή ισχύ 18660 kW στις 91 στροφές ανά λεπτό. Συνεπώς, με βάση



τα Tier I, II και III τα όρια εκπομπών NOX ανά κιλοβατώρα έχουν τιμές 17, 14.4 και 3.4 αντίστοιχα. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται οι ποσότητες παραγόμενων οξειδίων του αζώτου ανά κιλοβατώρα σε κάθε ταξίδι του πλοίου.

Διάγραμμα 30: Εκπομπές NO_x ανά κιλοβατώρα του υπό μελέτη πλοίου

Διαπιστώνεται ότι οι εκπομπές κινούνται εντός των ορίων που τίθενται από την Tier II με τη χρήση MDO να εξασφαλίζει επαρκώς τις συγκεκριμένες απαιτήσεις. Επιπροσθέτως, για την περίπτωση χρήσης υγροποιημένου φυσικού αερίου οι εκπομπές βρίσκονται σημαντικά χαμηλότερα των ορίων της Tier III, γεγονός που δεν προκύπτει από τη χρήση των άλλων δύο καυσίμων. Το τελευταίο επιβεβαιώνει τη διαπίστωση ότι η επίτευξη των ορίων του Tier III απαιτεί τη χρήση επιπλέον τεχνολογιών, όπως η επιλεκτική καταλυτική αναγωγή καυσαερίων (SCR) και η ανακυκλοφορία καυσαερίων (EGR), ή εναλλακτικά την καύση LNG (The HELMEPA Navigator, 2014).

Οι δύο διαδρομές που κινούνται εκτός των ορίων της Tier II εξαιρούνται της μελέτης με βάση την Ανάλυση Εύρεσης Έκτοπων που αναφέρθηκε στην παράγραφο 6.2.6.1 και περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα Α΄.

7.7 Αναγωγή αποτελεσμάτων του σεναρίου λειτουργίας σε βάθος εικοσαετίας

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο σημείο της παρούσας εργασίας, προκειμένου να υπάρξει δραστική μείωση των εκπομπών Σε προηγούμενο σημείο της εργασίας παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των υπολογισμών για τις εκπομπές ρύπων της
μπχανολογικής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια ενός έτους λειτουργίας του πλοίου. Όπως έχει αναφερθεί, η συγκεκριμένη ανάλυση βασίστηκε σε πραγματικά στοιχεία ταξιδιών του πλοίου που δόθηκαν από την πλοιοκτήτρια εταιρία.

Παρακάτω πραγματοποιείται μια αναγωγή των συγκεκριμένων αποτελεσμάτων σε χρονικό βάθος είκοσι χρόνων θεωρώντας ότι αυτό είναι ο μέσος όρος ζωής ενός πλοίου Bulk Carrier. Προκειμένου να αναχθούν τα αποτελέσματα ενός έτους λειτουργίας σε ορίζοντα είκοσι ετών γίνεται η παραδοχή ότι το πλοίο πραγματοποιεί τα ίδια δρομολόγια σε όλο τον κύκλο ζωής του, κάτω από τις ίδιες συνθήκες που περιγράφονται από τα διαθέσιμα δεδομένα ενός έτους λειτουργίας. Είναι προφανές ότι κάτι τέτοιο είναι αδύνατο να συμβεί εφόσον, ακόμη κι αν ακολουθηθούν οι ίδιες θαλάσσιες διαδρομές, υπάρχει ένα πλήθος παραγόντων που διαφοροποιείται σημαντικά (κατάσταση θάλασσας, κυματισμοί κ.λπ.). Παρ' όλα αυτά, η αναγωγή των αποτελεσμάτων σε επίπεδο εικοσαετίας μπορεί να αποτυπώσει μια γενική εικόνα των συνολικών εκπομπών αέριων ρύπων στον κύκλο ζωής του πλοίου.

	Λειτομονία
	είκοσι ετών
Δπόσταση [nm]	1262100
	11 20
	11.59
Ημερες ταξιοιου	4616.98
Ωρες στο λιμάνι	2332.92

Πίνακας 107: Χαρακτηριστικά είκοσι ετών λειτουργίας

Πίνακας 108: Κατανάλωση καυσίμου κατά τη διάρκεια είκοσι ετών λειτουργίας

Μηχανή	Μονάδα	Ποσότητα
Κύριες μηχανές	tn	160658.8653
Βοηθητικές μηχανές	tn	23976.6422
Συνολική κατανάλωση	tn	184635.5075

Πίνακας 109: Αναγωγή αέριων εκπομπών σε βάθος εικοσαετίας

		Ποσότητα ανά είδος καυσίμου		
Είδος ρύπου	Μονάδα	HFO	MDO	LNG
CO ₂	tn	574954.9705	591941.4372	507747.6457
NO _X	tn	14486.5019	13616.8687	1445.6960
SO _X	tn	9061.9107	487.4377	3.6927
PM	tn	1290.6022	188.3282	33.2344
CO	tn	511.4404	511.4404	1445.6960
CH ₄	tn	11.0781	11.0781	9453.3380
N_2O	tn	29.5417	27.6953	20.3099
NMVOC	tn	568.6774	568.6774	555.7529

8 Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η ανάπτυξη μιας πλατφόρμας που θα υπολογίζει και θα αναλύει τις εκπομπές καυσαερίων ενός πλοίου χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού αναπτύχθηκε, σε περιβάλλον Matlab, ένα υπολογιστικό πρόγραμμα που μελετάει το πλοίο ως σύνθεση δύο κύριων υποσυστημάτων: της μεταλλικής κατασκευής και της μηχανολογική εγκατάστασης. Η συνδυαστική ανάλυση των δύο αυτών υποσυστημάτων περιλαμβάνει όλα τα στάδια της ζωής τους, από την διαδικασία κατασκευής τους έως τη τελική διαδικασία απόσυρσης. Το υπολογιστικό εργαλείο αναπτύχθηκε στη βάση αλγόριθμων και εξισώσεων προηγούμενων μελετών του Τομέα Θαλασσίων Μεταφορών της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών και βασίζεται σε κώδικα 1800 γραμμών που γράφτηκε για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας. Πρόκειται για ένα διαδραστικό πρόγραμμα αφού χρησιμοποιεί πλαίσια διαλόγου προκειμένου να επικοινωνεί με τον χρήστη καθώς και να ζητάει και να δέχεται δεδομένα εισόδου. Επισημαίνεται ότι το σύνολο του περιβάλλοντος διεπαφής του προγράμματος είναι πλήρως μεταφρασμένο στην αγγλική γλώσσα.

Το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να παράγει αποτελέσματα σχετικά με τις αέριες εκπομπές για την περίπτωση χρήσης τριών διαφορετικών καυσίμων: βαρύ καύσιμο, θαλάσσιο πετρέλαιο ντίζελ και υγροποιημένο φυσικό αέριο. Οι εκπομπές που επιλέχθηκαν την ανάλυση είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), τα οξείδια του θείου (SO_x), τα οξείδια του αζώτου (NO_x), τα μικροσωματίδια (PM), το μεθάνιο (CH₄), το υποξείδιο του αζώτου (N₂O) και οι μη μεθανικές πτητικές οργανικές ενώσεις (NMVOC). Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής των αποτελεσμάτων σε πίνακες και διαγράμματα για περαιτέρω χρήση ή ανάλυση.

Σε δεύτερο στάδιο, χρειάστηκε να εξεταστεί η σωστή λειτουργία αλλά και η αξιοπιστία του υπολογιστικού μοντέλου. Για τους παραπάνω λόγους το πρόγραμμα δοκιμάστηκε για περίπτωση φορτηγού πλοίου μεταφοράς χύδην φορτίου 206104 DWT. Σε επίπεδο μεταλλικής κατασκευής εισήχθησαν, ως δεδομένα, οι κύριες διαστάσεις και χαρακτηριστικά του πλοίου. Σε επίπεδο μηχανολογικής εγκατάστασης χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά στοιχεία λειτουργίας ενός έτους που ήταν διαθέσιμα από την πλοιοκτήτρια εταιρία.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των υπολογισμών με αντίστοιχα αποτελέσματα άλλων μελετών αλλά και με πραγματικά στοιχεία διαθέσιμα από την εταιρία (κατανάλωση καυσίμου μηχανών) ανέδειξαν την αξιοπιστία του προγράμματος και της μεθόδου ανάλυσης που ακολουθεί.

Από την ανάλυση του κύκλου ζωής της μεταλλικής κατασκευής προέκυψε ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις εκπομπές των υπόλοιπων ρύπων. Σημαντική συμβολή στις συγκεκριμένες εκπομπές κατέχουν τα στάδια της παραγωγής και της ανακύκλωσης του χάλυβα. Ιδιαίτερα αυξημένες εμφανίζονται και οι εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα, ενώ οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου και του θείου είναι αρκετά μικρότερες χωρίς ωστόσο να θεωρούνται αμελητέες. Αντίθετα, σε πολύ χαμηλά επίπεδα βρίσκονται οι εκπομπές του μεθανίου (CH₄) και των μη μεθανικών πτητικών οργανικών ενώσεων (NMVOC).

Σελίδα |**111**

Η ανάλυση του κύκλου ζωής της μηχανολογικής εγκατάστασης επιβεβαίωσε ότι το διοξείδιο του άνθρακα είναι ο ρύπος με τις μεγαλύτερες ποσότητες εκπομπών σε όλα τα στάδια του υποσυστήματος ενώ ακολουθούν τα οξείδια του αζώτου και του θείου. Επιπροσθέτως, κατέστη εμφανές ότι η χρήση του LNG ως κύριου καυσίμου των μηχανών μπορεί να μειώσει δραστικά τους παραγόμενους ρύπους NO_X και PM και να εκμηδενίσει, σχεδόν, τις εκπομπές SO_X αποτελώντας μια ουσιαστική και ρεαλιστική πρόταση στην προσπάθεια ικανοποίησης των κανονισμών σχετικά με τα επιτρεπόμενα όρια εκπομπών οξειδίων του αζώτου και του θείου. Ωστόσο, όπως ήταν αναμενόμενο, αναδείχθηκε ότι η χρήση υγροποιημένου φυσικού αερίου μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση των εκπομπών CH₄ λόγω της εξαιρετικά υψηλής περιεκτικότητας του καυσίμου σε μεθάνιο. Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων, έγινε κατανοπτό ότι παρ' ότι το πρόγραμμα δεν έχει δυνατότητα ενσωμάτωσης των ιδιαίτερων συνθηκών κάθε ταξιδιού (καιρός, κυματισμοί, θαλάσσια ρεύματα) γίνεται αντιληπτό ότι μπορεί να δώσει μια αξιόπιστη συνολική εικόνα των ρύπων που παράγονται κατά τη λειτουργία του πλοίου.

Επισημαίνεται ότι το συγκεκριμένο πρόγραμμα επιχειρεί να συμβάλει στο πεδίο της καταγραφής και μελέτης των αέριων εκπομπών των πλοίων και προτείνει έναν συστηματικό τρόπο συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων για το πλήθος των διεργασιών στη διάρκεια ζωής ενός πλοίου που παίζουν σημαντικό ρόλο στην παραγωγή των ρύπων. Τέλος, το πρόγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί υποστηρικτικά κατά τη λήψη αποφάσεων που αφορούν σε μακροχρόνιο επίπεδο καθώς έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει εκπομπές αέριων ρύπων ανά έτος λειτουργίας ή ακόμη και σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του πλοίου.

8.1 Δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν κατά τη διάρκεια της μελέτης

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι γεγονός ότι η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) αποτελεί μια μέθοδο που έχει εφαρμοστεί ελάχιστα στη ναυτιλία σε σχέση με άλλους κλάδους της βιομηχανίας. Παρά το γεγονός ότι ο Τομέας Θαλάσσιων Μεταφορών της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ έχει εκπονήσει σημαντικές μελέτες γύρω από την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου στα πλοία, η ελληνική και ξενόγλωσση βιβλιογραφία γύρω από αυτή παραμένει ιδιαίτερα φτωχή.

Μια από τις σημαντικότερες δυσκολίες που αντιμετώπισε η παρούσα μελέτη ήταν η μεγάλη δυσκολία συγκέντρωσης πραγματικών στοιχείων σχετικών με τη λειτουργία των πλοίων. Το γεγονός αυτό καθυστέρησε σημαντικά την διαδικασία ελέγχου της αξιοπιστίας του αναπτυχθέντος υπολογιστικού εργαλείου και εμπόδισε την εξαγωγή περισσότερων συμπερασμάτων γύρω από το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των πλοίων μεταφοράς φορτίου χύδην. Εκτός αυτού, σε ορισμένες περιπτώσεις όπου κατέστη παντελώς αδύνατη η λήψη σχετικών στοιχείων και πληροφοριών, χρησιμοποιήθηκαν αντίστοιχες λογικές παραδοχές, με βάση τη βιβλιογραφία.

Τα παραπάνω καταδεικνύουν μια αδυναμία του ναυτιλιακού κλάδου να ανταποκριθεί στις τρέχουσες προκλήσεις που απαιτούν νέα εργαλεία ανάλυσης καθώς και σχολαστική καταγραφή και οργάνωση των πραγματικών στοιχείων που προκύπτουν από τη ναυτιλιακή δραστηριότητα. Ταυτόχρονα αναδεικνύουν τη σημασία περαιτέρω διεξαγωγής αντίστοιχων μελετών που κινούνται στην κατεύθυνση της ανάλυσης και βελτίωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των πλοίων.

9 Προτάσεις για περαιτέρω ανάπτυξη της εργασίας

Οι ακόλουθες κατευθύνσεις θα μπορούσαν να αποτελέσουν πεδία περαιτέρω ανάπτυξης της παρούσας εργασίας στο μέλλον:

- Εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου σε ένα πλήθος πλοίων Bulk Carrier, ίδιου
 ή διαφορετικού μεγέθους, προκειμένου να κατασκευαστεί μια βάση δεδομένων
 χρήσιμη για περαιτέρω μελέτη, σύγκριση και εξαγωγή συμπερασμάτων.
- Εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου σε ένα πλοίο για πολλές περιπτώσεις σεναρίων λειτουργίας. Ενδεικτικά, θα μπορούσαν να εξεταστούν, εφόσον υπάρχουν τα κατάλληλα δεδομένα, διαφορετικές ταχύτητες στις ίδιες διαδρομές.
- Τροποποίηση και επέκταση του υπολογιστικού εργαλείου ώστε να έχει τη δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου LCA σε διαφορετικούς τύπους πλοίων (Container, Tanker κ.λπ.). Ιδιαίτερη σημασία θα πρέπει να δοθεί στις μηχανές που βρίσκονται εγκατεστημένες σε κάθε τύπο πλοίου.
- Τροποποίηση και επέκταση του υπολογιστικού εργαλείου ώστε να έχει τη δυνατότητα συγχρονισμένης ανάλυσης στόλων πλοίων.
- Τροποποίηση του υπολογιστικού εργαλείου ώστε να υπάρχει η δυνατότητα ανάλυσης περισσότερων καυσίμων με βάση τις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις αλλά και την εξέλιξη στο χώρο της τεχνολογίας καυσίμων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Andersen, I. M. V. (2012). Emissions from Ship Machinery. Technical University of Denmark, Department of Mechanical Engineering, Section for Fluid Mechanics, Coastal and Maritime Engineering. 16 April 2012.
- Celebi, U. B., Vardar, N. (2008). Investigation of VOC emissions from indoor and outdoor painting processes in shipyards. Atmospheric Environment 2008, 42, 5685-5695.
- Chatzinikolaou, S. and Ventikos, N. P. (2014b) Assessing Environmental Impacts of Ships from a Life Cycle Perspective. Proceedings of the 2nd International Conference on Maritime Technology and Engineering, MARTECH 2014, 15-17 October 2014, Lisbon Portugal.
- Chatzinikolaou, S., Oikonomou, S., and Ventikos, N. P. (2015c). *Health Externalities of Ship Air Pollution at Port-Piraeus Port Case Study*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, Elsevier Series.
- Chatzinikolaou, S. D., Ventikos, N. P. (2015a). *Holistic framework for studying ship air emissions in a life cycle perspective.* Ocean Engineering, June 2015, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.05.042.
- Corbett, J. J., Winebrake, J. J., Green, E. H., Kasibhatla, P., Eyring, V., Lauer, A. (2007). Mortality from ship emissions: a global assessment. Environmental Science & Technology, 41, 8512-8518
- D'Almeida, J. (2009). Arquitectura Naval O Dimensionamento doNavio. Lisboa. Prime Books.
- Det Norske Veritas. (2009). DNV Bulk Carrier Magazine.
- Dutch Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment. (2000). The Eco-Indicator 99 – A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment – Methodology Report
- Ευρωπαϊκό κοινοβούλιο, Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. (2015). Κανονισμός (ΕΕ) 2015/757 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 29^{ης} Απριλίου 2015 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. L 123/55/19.5.2015
- Guinee Jeroen B. et al. (2010). Life Cycle Assessment: Past. Present and Future. American Chemical Society. 10.1021/es101316v.
- International Association of Classification Societies, IACS, (2015). Requirements concerning machinery installations.
- International Maritime Organisation, IMO, (2015). Air pollution and energy efficiency. Industry guidelines on calculation and verification of the Energy Efficiency Design Index (EEDI).

- International Maritime Organisation, IMO, (2014). *Reduction of GHG emissions from ships*. Third IMO GHG Study 2014, Final Report.
- International Standard, ISO:14040, (1997), Environmental management Life cycle assessment Principles and framework. 15 June 1997.
- International Standard, ISO:14044, (2006), Environmental management Life cycle assessment Requirements and guidelines. 01 July 2006.
- Jiven K., Sjöbris A., Nilsson M., Ellis J., Trägårdh P., Nordström M. (2004). LCA-ship, Design tool for energy efficient ships - A Life Cycle Analysis Program for Ships. Final report.
- Kameyama, M., Hiraoka, K., Sakurai, A., Naruse, T., Tauchi, H. (2004). Development of LCA software for ships and LCI analysis based on actual shipbuilding and operation.
 Proceedings of the 6th International Conference on EcoBalance, 159-162, 25-27 October 2004, Tsukuba, Japan.
- MAN Diesel & Turbo. (2014). Propulsion of 200,000-210,000 dwt Large Capesize Bulk Carrier.
- Μαντάκος, Ν. (2012). Αξιολόγηση του κύκλου ζωής της μηχανολογικής εγκατάστασης πλοίων. Διπλωματική διατριβή. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών. Αθήνα, Ελλάδα.
- National Cooperative Freight Research Program, NCFRP, (2010). Representing freight in Air Quality and Greenhouse Gas Models. Report 4.
- Πανταζής, Κ. (2010). Ανάπτυξη μοντέλου καύσης βαρέος καυσίμου για εφαρμογές ναυτικών κινητήρων Diesel. Διπλωματική διατριβή. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών. Αθήνα, Ελλάδα.
- Παπακώστας, Γ. (2011). Δείκτης σχεδίασης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (ΕΕDΙ). Διπλωματική διατριβή. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών. Αθήνα, Ελλάδα.
- Ρουμελιώτη, Η. (2013). Ανάλυση κύκλου ζωής της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου. Διπλωματική διατριβή. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών. Αθήνα, Ελλάδα.
- The Helmepa Navigator. (2014). Εφαρμογή του Παραρτήματος VI της MARPOL Εξελίξεις στην MEPC 66. Τεχνικό Δελτίο, 112. Απρίλιος 2014.
- The International Council on Clean Transportation, ICCT. (2007). Air pollution and Greenhouse Gas Emissions from Ocean-going Ships. www.theicct.org
- Tilwankar Atit K., Amit B. Mahindrakar and Shyam R. Asolekar. (2008). Steel Recycling Resulting from Ship Dismantling in India: Implications for Green House Gas Emissions. Proceedings of the second International Conference on Dismantling of Obsolete Vessels, 15-16 September 2008, Glasgow, United Kingdom.

- Turan, O., Ölçer, A., Lazakis, I., Rigo, P., Caprace, J. D. (2009). Maintenance/repair and production-oriented life cycle cost/earning model for ship structural optimisation during conceptual design stage. Ships and Offshore Structures, 4(2), 107–125. http://dx.doi.org/10.1080/17445300802564220.
- Tzannatos, E. (2010). Ship emissions and their externalities for the port of Piraeus Greece. Atmospheric Environment, 44, 400-407.
- Unseki, T. (2013). Environmentally Superior LNG-Fueled Vessels. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 50-2, June 2013.
- Ventura, M. (2006). Estimation Methods for Basic Ship Design. Technical University of Lisbon.
- World Health Organisation WHO, (2014). 7 million premature deaths annually linked to air pollution, Retrieved from: http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/, accessed at 2/11/2015.
- Χατζηλάου, Κ. Α., Μοστράτος, Ι. Κ. (1978). Η έκχυση του καυσίμου στις ναυτικές μηχανές Diesel. Εκδόσεις Σταυριδάκη.

ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bengtsson, S., (2011). Life Cycle Assessment of Present and Future Marine Fuels, Thesis for Licentiate of Engineering submitted to the Department of Shipping and Marine Technology, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- Chatzinikolaou, S. and Ventikos, N. P. (2014a). *Applications of Life Cycle Assessment in Shipping.* Proceedings of the 2nd International Symposium of Naval Architecture and Maritime, YTU GIDF, 23-24 October 2014, Istanbul, Turkey.
- Chatzinikolaou, S., Ventikos, N.P. (2015b).Critical analysis of air emissions from ships: life cycle thinking and results. Psaraftis, H. N. (Ed.), Green transport logistics: the quest for win-win solutions. Volume 226 of the series: International Series in Operations Research & Management Science, 387-412.
- Finnveden, G. et al. (2009). *Recent developments in Life Cycle Assessment*. Journal of Environmental Management, 91, 1–21.
- Gratsos, G., Psaraftis H. N., Zachariadis P. (2010). *Life-cycle CO2 Emissions of Bulk Carriers: A Comparative Study*. Trans RINA, Vol. 152, Part A3, International Journal of Maritime Engineering. July-Septempber 2010.
- Hou, Q. (2011). Life Cycle Assessment of Cruising Ship Superstructure (Master Thesis in Sustainable Development). Uppsala Universit., Uppsala, Sweden.
- Κυρτάτος, Ν. Π., Ιωάννου, Μ., Στέλιος, Τ. (2009). Μετρήσεις ρύπων σε ναυτικούς κινητήρες. Ετήσια συνάντηση ναυτικής τεχνολογίας 2009, Αθήνα, Ελλάδα.
- Lindstad, H., Eskeland, G. S., Psaraftis, H., Sandaas, I., Strømman, A. H. (2015). *Maritime Shipping and Emissions: A three-layered, damage-based approach.* Ocean Engineering Journal.
- Psaraftis, H., Contovas, C. (2009). CO₂ Emission Statistics for the World Commercial Fleet, WMU Journal of Maritime Affairs.
- Rehmatulla, N., Smith, T. (2015). Barriers to energy efficient and low carbon shipping. Ocean Engineering Journal.
- Ryste, J. M. (2012). Screening LCA of GHG emissions related to LNG as ship fuel. Master thesis final report of the M.Sc. degree at the Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Department of Marine Technology.
- Trodden, D. G., Murphy, A. J., Pazouki K., Sargeant J. (2015). Fuel usage data analysis for *efficient shipping operations*. Ocean Engineering Journal.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α΄

Σε αυτό το παράρτημα παρατίθεται η Μέθοδος Εύρεσης Έκτοπων (Outlier Analysis) με βάση την οποία εξαιρέθηκαν από την ανάλυση οι υπολογισθείσες τιμές εκπομπών αέριων ρύπων δύο ταξιδιών του υπό μελέτη πλοίου.

Η μέθοδος εφαρμόστηκε στις περιπτώσεις εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ανά τονομίλι και οξειδίων του αζώτου ανά κιλοβατώρα. Ακολουθούν τα βήματα της μεθόδου για κάθε περίπτωση.

1. Εκπομπές CO2 ανά τονομίλι

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα δεδομένα των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ανά τονομίλι των έντεκα ταξιδιών (N = 11) που μελετώνται. Η παράθεση γίνεται με αύξουσα σειρά.

Αριθμός	Γραμμάρια CO2
ταξιδιού	ανά τονομίλι
1	0.000001688714684313
2	0.000001973230750435
3	0.000001982842453220
4	0.000002034205087829
5	0.000002035706834130
6	0.000002053392784881
7	0.000002081210053136
8	0.000002084184037073
9	0.000002175990768253
10	0.000003021301366607
11	0.000003266216103463

Η μέθοδος εφαρμόζεται με βάση τα ακόλουθα βήματα:

- $\Delta \iota \dot{a} \mu \epsilon \sigma o \varsigma (Median) = 60 \sigma \eta \mu \epsilon i o = 0.000002053392784881$
- Χαμηλότεταρτημόριο (Lower quartile) = 0.25 · (N + 1)οστό σημείο = 3ο σημείο = 0.000001982842453220
- Υψηλότεταρτημόριο (Upper quartile) = 0.75 · (N + 1)οστό σημείο = 9ο σημείο = 0.000002175990768253
- Ενδοτεταρτημοριακόεύρος (Interquartile range) =
 Υψηλό τεταρτημόριο Χαμηλό τεταρτημόριο = 0.0000001931483150
- Χαμηλόεσωτερικό όριο (Lower inner fence) = Χαμηλό τεταρτημόριο - 1.5 · Ενδοτεταρτημοριακό εύρος = 0.0000016931199807

- Υψηλό εσωτερικό όριο (Upper inner fence) =
 Υψηλό τεταρτημόριο + 1.5 · Ενδοτεταρτημοριακό εύρος =
 0.0000024657132408
- Χαμηλόεξωτερικό όριο (Lower outer fence) = Χαμηλό τεταρτημόριο - 3.0 · Ενδοτεταρτημοριακό εύρος = 0.0000014033975081
- Υψηλόεξωτερικό όριο (Upper outer fence) =
 Υψηλό τεταρτημόριο + 3.0 · Ενδοτεταρτημοριακό εύρος =
 0.0000027554357134

Από την μελέτη των οριακών σημείων και των δεδομένων προκύπτει ότι δύο σημεία (0.000003021301366607 και 0.000003266216103463) υπερβαίνουν το υψηλότερο εξωτερικό όριο και συνεπώς εξαιρούνται της ανάλυσης ως ακραία έκτοπα.

2. Εκπομπές ΝΟ_x ανά κιλοβατώρα

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα δεδομένα των εκπομπών οξειδίων του αζώτου ανά κιλοβατώρα των εικοσιένα ταξιδιών (*N* = 21) που μελετώνται. Η παράθεση γίνεται με αύξουσα σειρά.

Αριθμός	Γραμμάρια NO _x
ταξιδιού	ανά κιλοβατώρα
1	13.60249662
2	13.6127185
3	13.67069951
4	13.67225729
5	13.6777978
6	13.68944173
7	13.71166703
8	13.81920324
9	13.84267239
10	13.85182923
11	13.8606888
12	13.86502336
13	13.87281482
14	13.89725576
15	13.90448538
16	13.9509316
17	14.19249511
18	14.28587026
19	14.84522551
20	16.18387707
21	16.1848463

Η μέθοδος εφαρμόζεται με βάση τα ακόλουθα βήματα:

- $\Delta \iota \dot{a} \mu \epsilon \sigma o \varsigma$ (*Median*) = 110 $\sigma \eta \mu \epsilon \dot{o}$ = 13.8606888
- Χαμηλότεταρτημόριο (Lower quartile) = 0.25 · (N + 1)οστό σημείο = 5ο σημείο = 13.6777978
- Υψηλότεταρτημόριο (Upper quartile) = 0.75 · (N + 1)οστό σημείο = 17ο σημείο = 14.19249511
- Ενδοτεταρτημοριακόεύρος (Interquartile range) = Υψηλό τεταρτημόριο – Χαμηλό τεταρτημόριο = 0.514697308
- Χαμηλόεσωτερικό όριο (Lower inner fence) = Χαμηλό τεταρτημόριο – 1.5 · Ενδοτεταρτημοριακό εύρος = 12.90575184
- Υψηλό εσωτερικό όριο (Upper inner fence) =
 Υψηλό τεταρτημόριο + 1.5 · Ενδοτεταρτημοριακό εύρος =
 14.96454107
- Χαμηλόεξωτερικό όριο (Lower outer fence) = Χαμηλό τεταρτημόριο – 3.0 · Ενδοτεταρτημοριακό εύρος = 12.13370588
- Υψηλό εξωτερικό όριο (Upper outer fence) =
 Υψηλό τεταρτημόριο + 3.0 · Ενδοτεταρτημοριακό εύρος =
 15.73658703

Από την μελέτη των οριακών σημείων και των δεδομένων προκύπτει ότι δύο σημεία (16.18387707 και 16.1848463) υπερβαίνουν το υψηλότερο εξωτερικό όριο και συνεπώς εξαιρούνται της ανάλυσης ως ακραία έκτοπα.