



# **ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

**Συγκριτική μελέτη της λειτουργίας στόλου με τη χρήση  
κριτηρίων βιωσιμότητας: Ανάπτυξη υπολογιστικού εργαλείου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΧΡΗΣΤΟΣ ΔΑΣΚΑΛΑΚΗΣ**

Επιβλέπων:

Νικόλαος Π. Βεντικός, Δρ.  
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2018

*Στους γονείς μου Νικόλαο και Κυριακούλα  
και στον αδερφό μου Γιάννη.*

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία συμπίπτει με την ολοκλήρωση των σπουδών μου στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αυτή η περίοδος υπήρξε ιδιαίτερα σημαντική στη ζωή μου, καθότι έλαβα υψηλού επιπέδου εξειδικευμένη γνώση στο αντικείμενο των σπουδών μου, η οποία θεωρώ ότι θα με βοηθήσει ιδιαίτερα στην επαγγελματική μου σταδιοδρομία. Παράλληλα, είχα την τύχη να συνεργαστώ με πλήθος αξιόλογων ανθρώπων που αποτέλεσαν πηγή έμπνευσης και σημείο στήριξής μου, τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα για την ανεκτίμητη παρουσία τους.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες επιθυμώ να απευθύνω στον Δρ. Νικόλαο Π. Βεντίκο, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, 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.

Τέλος, ευχαριστώ ξεχωριστά την κα Ειρήνη-Ασημίνα Σταματοπούλου, Ναυπηγό Μηχανολόγο Μηχανικό, Υποψήφια Διδάκτορα στο Εργαστήριο Θαλασίων Μεταφορών ΕΜΠ, η οποία με τη γνώση, την εμπειρία και τις στοχευμένες υποδείξεις της βοήθησε να ολοκληρώσω επιτυχώς την εργασία μου, προσφέροντάς μου την άριστη συνεργασία της.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	4
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ .....	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	11
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	12
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ.....	13
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ .....	16
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	17
ABSTRACT .....	19
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>21</b>
<b>2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ .....</b>	<b>24</b>
2.1 LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA).....	24
2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ (LCSA).....	25
2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΠΛΟΙΟΥ .....	27
2.4 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΩΝ LCA ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ .....	28
<b>3. ΑΕΡΙΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΠΟ ΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ.....</b>	<b>32</b>
3.1 ΚΥΡΙΕΣ ΑΕΡΙΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ .....	32
3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ .....	36
<b>4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ BULK CARRIER .....</b>	<b>39</b>
4.1 Η ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ.....	39
4.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ BULK CARRIER .....	41
4.2.1 Κόστος λειτουργίας.....	42
4.2.2 Κόστος ταξιδιού .....	44
4.2.3 Κόστος κεφαλαίου .....	45
4.2.4 Κόστος περιοδικής συντήρησης.....	46
<b>5. ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ .....</b>	<b>47</b>
5.1 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ.....	47
5.2 ΤΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΤΩΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΩΝ .....	47
5.3 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ.....	52
5.3.1 Κανονισμός MRV.....	52
5.3.2 Δείκτης EEDI.....	53
5.3.3 Περιοχές ελέγχου εκπομπών .....	54
<b>6. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....</b>	<b>57</b>
6.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΕΡΙΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ .....	58
6.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ .....	59
6.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ.....	59
<b>7. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ.....</b>	<b>62</b>
7.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MATLAB.....	62

7.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ.....	63
7.2.1 Περιγραφή αρχείων.....	64
7.2.2 Δεδομένα εισόδου.....	68
7.3 ΓΡΑΦΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΠΛΑΙΣΙΑ ΔΙΑΛΟΓΟΥ .....	69
<b>8. ΣΕΝΑΡΙΟ/Α ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....</b>	<b>73</b>
8.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΣΤΟΛΩΝ.....	73
8.2 ΣΕΝΑΡΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	78
8.3 ΣΕΝΑΡΙΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ .....	78
8.4 ΣΕΝΑΡΙΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ.....	79
<b>9. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>80</b>
9.1 ΣΕΝΑΡΙΟ 1 – ΊΔΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΓΙΑ ΟΛΑ ΤΑ ΠΛΟΙΑ.....	80
9.1.1 Καύσιμο HFO.....	81
9.1.2 Καύσιμο MDO.....	86
9.1.3 Καύσιμο LNG.....	91
9.1.4 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων και σύγκριση για τα τρία είδη καυσίμων .....	96
9.1.5 Ανάλυση των αποτελεσμάτων με βάση τους ισχύοντες κανονισμούς.....	98
9.2 ΣΕΝΑΡΙΟ 2 – ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΠΛΟΙΟ .....	100
9.2.1 Καύσιμο HFO.....	101
9.2.2 Καύσιμο MDO.....	106
9.2.3 Καύσιμο LNG.....	111
9.2.4 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων και σύγκριση για τα τρία είδη καυσίμων .....	116
9.2.5 Ανάλυση των αποτελεσμάτων με βάση τους ισχύοντες κανονισμούς.....	118
9.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ .....	120
<b>10. ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ .....</b>	<b>124</b>
<b>11. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>127</b>
<b>12. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....</b>	<b>130</b>
<b>13. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>131</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Εκπομπές CO <sub>2</sub> 2007-2012 .....	21
Πίνακας 2: Εκπομπές CO <sub>2e</sub> 2007-2012 .....	21
Πίνακας 3: Ανάπτυξη του διεθνούς θαλασσιού εμπορίου .....	23
Πίνακας 4: Μέγεθος στόλου Bulk Carrier σε εκατομμύρια τόνους DWT.....	39
Πίνακας 5: Καταμερισμός κόστους των Bulk Carrier.....	41
Πίνακας 6: Ανάλυση κόστους για πλοίο Capesize Bulk Carrier δέκα ετών με τιμές 2005 .....	42
Πίνακας 7: Κόστος λειτουργίας Capesize bulk carriers .....	43
Πίνακας 8: Όρια εκπομπών SO <sub>x</sub> .....	54
Πίνακας 9: Όρια εκπομπών NO <sub>x</sub> .....	55
Πίνακας 10: Ημέρες σε ένα έτος όπου το πλοίο μένει ανενεργό συναρτήσει της ηλικίας ...	58
Πίνακας 11: Συντελεστές αέριων εκπομπών κατά τη λειτουργία του πλοίου .....	59
Πίνακας 12: Συντελεστές εξωτερικού κόστους συναρτήσει της θαλάσσιας περιοχής .....	60
Πίνακας 13: Δυναμικό παγκόσμιας θέρμανσης .....	60
Πίνακας 14: Συντελεστής εξωτερικού κόστους αερίων του θερμοκηπίου .....	61
Πίνακας 15: Δεδομένα που απαιτούνται να καταγράφονται από τον Κανονισμό MRV .....	67
Πίνακας 16: Δεδομένα εισόδου σεναρίου λειτουργίας .....	68
Πίνακας 17: Δεδομένα εισόδου για κάθε πλοίο του στόλου .....	68
Πίνακας 18: Κύριες διαστάσεις και χαρακτηριστικά 1 <sup>ου</sup> στόλου.....	73
Πίνακας 19: Κύριες διαστάσεις και χαρακτηριστικά 2 <sup>ου</sup> στόλου.....	74
Πίνακας 20: Ειδική κατανάλωση καυσίμου κάθε πλοίου .....	74
Πίνακας 21: Αέριες εκπομπές 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO .....	75
Πίνακας 22: Αέριες εκπομπές 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO .....	75
Πίνακας 23: Αέριες εκπομπές 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG .....	75
Πίνακας 24: Αέριες εκπομπές 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO .....	75
Πίνακας 25: Αέριες εκπομπές 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO .....	76
Πίνακας 26: Αέριες εκπομπές 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG .....	76
Πίνακας 27: Αέριες εκπομπές 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO για το 2 <sup>ο</sup> σενάριο ταχυτήτων....	76
Πίνακας 28: Αέριες εκπομπές 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO για το 2 <sup>ο</sup> σενάριο ταχυτήτων ..	77
Πίνακας 29: Αέριες εκπομπές 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG για το 2 <sup>ο</sup> σενάριο ταχυτήτων....	77
Πίνακας 30: Αέριες εκπομπές 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO για το 2 <sup>ο</sup> σενάριο ταχυτήτων....	77
Πίνακας 31: Αέριες εκπομπές 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO για το 2 <sup>ο</sup> σενάριο ταχυτήτων ..	77
Πίνακας 32: Αέριες εκπομπές 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG για το 2 <sup>ο</sup> σενάριο ταχυτήτων....	78
Πίνακας 33: Ταχύτητα λειτουργίας για το 2 <sup>ο</sup> σενάριο λειτουργίας .....	78
Πίνακας 34: Τιμή καυσίμων (Ιανουαρίου 2018) .....	79
Πίνακας 35: Εξωτερικό κόστος για τον Βόρειο-Δυτικό Ατλαντικό Ωκεανό .....	79
Πίνακας 36: Γενικά δεδομένα βέλτιστου συνδυασμού 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 1 <sup>ο</sup> σενάριο.....	81
Πίνακας 37: Γενικά δεδομένα βέλτιστου συνδυασμού 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 1 <sup>ο</sup> σενάριο.....	82
Πίνακας 38: Συνολικά δεδομένα 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 1 <sup>ο</sup> σενάριο .....	82
Πίνακας 39: Δεδομένα ανά διαδρομή 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 1 <sup>ο</sup> σενάριο .....	83
Πίνακας 40: Δεδομένα ανά διαδρομή 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 1 <sup>ο</sup> σενάριο .....	84
Πίνακας 41: Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 1 <sup>ο</sup> σενάριο.....	84

<b>Πίνακας 42:</b> Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 1 <sup>ο</sup> σενάριο .....	85
<b>Πίνακας 43:</b> Συνολικά δεδομένα για ένα έτος λειτουργίας 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> με καύσιμο HFO 1 <sup>ο</sup> σενάριο.....	86
<b>Πίνακας 44:</b> Γενικά δεδομένα βέλτιστου συνδυασμού 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 1 <sup>ο</sup> σενάριο.....	86
<b>Πίνακας 45:</b> Γενικά δεδομένα βέλτιστου συνδυασμού 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 1 <sup>ο</sup> σενάριο.....	87
<b>Πίνακας 46:</b> Συνολικά δεδομένα 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 1 <sup>ο</sup> σενάριο.....	87
<b>Πίνακας 47:</b> Δεδομένα ανά διαδρομή 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 1 <sup>ο</sup> σενάριο .....	88
<b>Πίνακας 48:</b> Δεδομένα ανά διαδρομή 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 1 <sup>ο</sup> σενάριο .....	89
<b>Πίνακας 49:</b> Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 1 <sup>ο</sup> σενάριο .....	89
<b>Πίνακας 50:</b> Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 1 <sup>ο</sup> σενάριο.....	90
<b>Πίνακας 51:</b> Συνολικά δεδομένα για ένα έτος λειτουργίας 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> με καύσιμο MDO 1 <sup>ο</sup> σενάριο.....	91
<b>Πίνακας 52:</b> Γενικά δεδομένα βέλτιστου συνδυασμού 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 1 <sup>ο</sup> σενάριο.....	91
<b>Πίνακας 53:</b> Γενικά δεδομένα βέλτιστου συνδυασμού 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 1 <sup>ο</sup> σενάριο.....	92
<b>Πίνακας 54:</b> Συνολικά δεδομένα 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 1 <sup>ο</sup> σενάριο.....	92
<b>Πίνακας 55:</b> Δεδομένα ανά διαδρομή 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 1 <sup>ο</sup> σενάριο .....	93
<b>Πίνακας 56:</b> Δεδομένα ανά διαδρομή 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 1 <sup>ο</sup> σενάριο .....	94
<b>Πίνακας 57:</b> Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 1 <sup>ο</sup> σενάριο .....	94
<b>Πίνακας 58:</b> Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 1 <sup>ο</sup> σενάριο .....	95
<b>Πίνακας 59:</b> Συνολικά δεδομένα για ένα έτος λειτουργίας 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> με καύσιμο LNG 1 <sup>ο</sup> σενάριο.....	96
<b>Πίνακας 60:</b> Συνολικά δεδομένα για του 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> στόλου για HFO και MDO 1 <sup>ο</sup> σενάριο....	97
<b>Πίνακας 61:</b> Εκπομπές CO <sub>2</sub> ανά τονομίλι 1 <sup>ου</sup> στόλου 1 <sup>ο</sup> σενάριο.....	98
<b>Πίνακας 62:</b> Εκπομπές CO <sub>2</sub> ανά τονομίλι 2 <sup>ου</sup> στόλου 1 <sup>ο</sup> σενάριο.....	98
<b>Πίνακας 63:</b> Εκπομπές NO <sub>x</sub> ανά κιλοβατώρα 1 <sup>ου</sup> στόλου 1 <sup>ο</sup> σενάριο .....	99
<b>Πίνακας 64:</b> Εκπομπές NO <sub>x</sub> ανά κιλοβατώρα 2 <sup>ου</sup> στόλου 1 <sup>ο</sup> σενάριο .....	99
<b>Πίνακας 65:</b> Γενικά δεδομένα βέλτιστου συνδυασμού 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 2 <sup>ο</sup> σενάριο.....	101
<b>Πίνακας 66:</b> Γενικά δεδομένα βέλτιστου συνδυασμού 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 2 <sup>ο</sup> σενάριο.....	102
<b>Πίνακας 67:</b> Συνολικά δεδομένα 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	102
<b>Πίνακας 68:</b> Δεδομένα ανά διαδρομή 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	103
<b>Πίνακας 69:</b> Δεδομένα ανά διαδρομή 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	104
<b>Πίνακας 70:</b> Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 2 <sup>ο</sup> σενάριο.....	104
<b>Πίνακας 71:</b> Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	105
<b>Πίνακας 72:</b> Συνολικά δεδομένα για ένα έτος λειτουργίας 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> με καύσιμο HFO 2 <sup>ο</sup> σενάριο.....	106
<b>Πίνακας 73:</b> Γενικά δεδομένα βέλτιστου συνδυασμού 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 2 <sup>ο</sup> σενάριο.....	106
<b>Πίνακας 74:</b> Γενικά δεδομένα βέλτιστου συνδυασμού 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 2 <sup>ο</sup> σενάριο.....	107

<b>Πίνακας 75:</b> Συνολικά δεδομένα 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	107
<b>Πίνακας 76:</b> Δεδομένα ανά διαδρομή 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	108
<b>Πίνακας 77:</b> Δεδομένα ανά διαδρομή 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	109
<b>Πίνακας 78:</b> Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 2 <sup>ο</sup> σενάριο ....	109
<b>Πίνακας 79:</b> Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 2 <sup>ο</sup> σενάριο.....	110
<b>Πίνακας 80:</b> Συνολικά δεδομένα για ένα έτος λειτουργίας 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> με καύσιμο MDO 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	111
<b>Πίνακας 81:</b> Γενικά δεδομένα βέλτιστου συνδυασμού 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	111
<b>Πίνακας 82:</b> Γενικά δεδομένα βέλτιστου συνδυασμού 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	112
<b>Πίνακας 83:</b> Συνολικά δεδομένα 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 2 <sup>ο</sup> σενάριο.....	112
<b>Πίνακας 84:</b> Δεδομένα ανά διαδρομή 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	113
<b>Πίνακας 85:</b> Δεδομένα ανά διαδρομή 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	114
<b>Πίνακας 86:</b> Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	114
<b>Πίνακας 87:</b> Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	115
<b>Πίνακας 88:</b> Συνολικά δεδομένα για ένα έτος λειτουργίας 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> με καύσιμο LNG 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	116
<b>Πίνακας 89:</b> Συνολικά δεδομένα για του 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> στόλου για HFO και MDO 2 <sup>ο</sup> σενάριο..	116
<b>Πίνακας 90:</b> Εκπομπές CO <sub>2</sub> ανά τονομίλι 1 <sup>ου</sup> στόλου 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	118
<b>Πίνακας 91:</b> Εκπομπές CO <sub>2</sub> ανά τονομίλι 2 <sup>ου</sup> στόλου 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	118
<b>Πίνακας 92:</b> Εκπομπές NO <sub>x</sub> ανά κιλοβατώρα 1 <sup>ου</sup> στόλου 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	119
<b>Πίνακας 93:</b> Εκπομπές NO <sub>x</sub> ανά κιλοβατώρα 2 <sup>ου</sup> στόλου 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	119
<b>Πίνακας 94:</b> Συνολικές αέριες εκπομπές για τον κύκλο ζωής των συνδυασμών.....	125
<b>Πίνακας 95:</b> Αποτελέσματα Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.....	126



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

<b>Διάγραμμα 1:</b> Εκπομπές μηχανολογικής εγκατάστασης κατά την κανονική λειτουργία του πλοίου .....	29
<b>Διάγραμμα 2:</b> Εκπομπές CO <sub>2</sub> στη φάση της κατασκευής.....	30
<b>Διάγραμμα 3:</b> Εκπομπές CO, CH <sub>4</sub> , NO <sub>x</sub> , PM, SO <sub>2</sub> , VOC, SO <sub>x</sub> και NMVOC στη φάση της κατασκευής .....	30
<b>Διάγραμμα 4:</b> Αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια ενός έτους λειτουργίας) .....	31
<b>Διάγραμμα 5:</b> Οι σημαντικότεροι πηγές εκπομπής CO <sub>2</sub> το 2015.....	35
<b>Διάγραμμα 6:</b> Προσφορά, ζήτηση και χρήση.....	40
<b>Διάγραμμα 7:</b> Εισαγωγές ξηρού φορτίου ανά χώρα/περιοχή .....	40
<b>Διάγραμμα 8:</b> Ημερήσια λειτουργικά έξοδα Capesize Bulk Carrier (5 ετών).....	44
<b>Διάγραμμα 9:</b> Ποσοστό κόστους συναρτήσει της ηλικίας του πλοίου .....	46
<b>Διάγραμμα 10:</b> Όρια EEDI ανά χωρητικότητα πλοίου.....	53
<b>Διάγραμμα 11:</b> Γραμμή αναφοράς δείκτη EEDI .....	54
<b>Διάγραμμα 12:</b> Όρια SO <sub>x</sub> .....	55
<b>Διάγραμμα 13:</b> Όρια εκπομπών NO <sub>x</sub> .....	56
<b>Διάγραμμα 14:</b> Εξωτερικό κόστος GHG.....	61
<b>Διάγραμμα 15:</b> Ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου του 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 1 <sup>ο</sup> σενάριο.....	81
<b>Διάγραμμα 16:</b> Ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου του 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 1 <sup>ο</sup> σενάριο.....	82
<b>Διάγραμμα 17:</b> Σύγκριση 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 1 <sup>ο</sup> σενάριο .....	83
<b>Διάγραμμα 18:</b> Ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου του 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 1 <sup>ο</sup> σενάριο.....	86
<b>Διάγραμμα 19:</b> Ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου του 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 1 <sup>ο</sup> σενάριο.....	87
<b>Διάγραμμα 20:</b> Σύγκριση 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 1 <sup>ο</sup> σενάριο.....	88
<b>Διάγραμμα 21:</b> Ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου του 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 1 <sup>ο</sup> σενάριο.....	91
<b>Διάγραμμα 22:</b> Ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου του 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 1 <sup>ο</sup> σενάριο.....	92
<b>Διάγραμμα 23:</b> Σύγκριση 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 1 <sup>ο</sup> σενάριο .....	93
<b>Διάγραμμα 24:</b> Σύγκριση 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> στόλου για HFO και MDO 1 <sup>ο</sup> σενάριο .....	97
<b>Διάγραμμα 25:</b> Εκπομπές CO <sub>2</sub> ανά τονομίλι 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> στόλου 1 <sup>ο</sup> σενάριο .....	98
<b>Διάγραμμα 26:</b> Εκπομπές NO <sub>x</sub> ανά κιλοβατώρα 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> στόλου 1 <sup>ο</sup> σενάριο .....	99
<b>Διάγραμμα 27:</b> Ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου του 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 2 <sup>ο</sup> σενάριο.....	101
<b>Διάγραμμα 28:</b> Ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου του 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 2 <sup>ο</sup> σενάριο.....	102
<b>Διάγραμμα 29:</b> Σύγκριση 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	103
<b>Διάγραμμα 30:</b> Ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου του 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 2 <sup>ο</sup> σενάριο.....	106
<b>Διάγραμμα 31:</b> Ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου του 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 2 <sup>ο</sup> σενάριο.....	107

<b>Διάγραμμα 32:</b> Σύγκριση 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 2 <sup>ο</sup> σενάριο.....	108
<b>Διάγραμμα 33:</b> Ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου του 1 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 2 <sup>ο</sup> σενάριο.....	111
<b>Διάγραμμα 34:</b> Ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου του 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 2 <sup>ο</sup> σενάριο.....	112
<b>Διάγραμμα 35:</b> Σύγκριση 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	113
<b>Διάγραμμα 36:</b> Σύγκριση 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> στόλου για HFO και MDO 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	117
<b>Διάγραμμα 37:</b> Εκπομπές CO <sub>2</sub> ανά τονομίλι 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> στόλου 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	119
<b>Διάγραμμα 38:</b> Εκπομπές NO <sub>x</sub> ανά κιλοβατώρα 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> στόλου 2 <sup>ο</sup> σενάριο .....	120
<b>Διάγραμμα 39:</b> Σύγκριση 1 <sup>ου</sup> στόλου για το 1 <sup>ο</sup> και το 2 <sup>ο</sup> σενάριο με καύσιμο HFO .....	121
<b>Διάγραμμα 40:</b> Σύγκριση 1 <sup>ου</sup> στόλου για το 1 <sup>ο</sup> και το 2 <sup>ο</sup> σενάριο με καύσιμο MDO.....	121
<b>Διάγραμμα 41:</b> Σύγκριση 1 <sup>ου</sup> στόλου για το 1 <sup>ο</sup> και το 2 <sup>ο</sup> σενάριο με καύσιμο LNG.....	122
<b>Διάγραμμα 42:</b> Σύγκριση 2 <sup>ου</sup> στόλου για το 1 <sup>ο</sup> και το 2 <sup>ο</sup> σενάριο με καύσιμο HFO .....	122
<b>Διάγραμμα 43:</b> Σύγκριση 2 <sup>ου</sup> στόλου για το 1 <sup>ο</sup> και το 2 <sup>ο</sup> σενάριο με καύσιμο MDO.....	123
<b>Διάγραμμα 44:</b> Σύγκριση 2 <sup>ου</sup> στόλου για το 1 <sup>ο</sup> και το 2 <sup>ο</sup> σενάριο με καύσιμο LNG.....	123
<b>Διάγραμμα 45:</b> Συνολικές αέριες εκπομπές για τον κύκλο ζωής των συνδυασμών .....	125
<b>Διάγραμμα 46:</b> Αποτελέσματα Ανάλυσης Κύκλου Ζωής .....	126

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>Σχήμα 1:</b> Τα στάδια της μεθόδου LCA .....	24
<b>Σχήμα 2:</b> Πεδίο εφαρμογής της μεθόδου LCSA .....	27
<b>Σχήμα 3:</b> Δομή συστήματος ανάλυσης κύκλου ζωής πλοίου .....	28
<b>Σχήμα 4:</b> Impact Pathway Approach (IPA) .....	49
<b>Σχήμα 5:</b> Συνολική ποσότητα διαρρέοντος πετρελαίου την περίοδο 1967-2016.....	51

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

<b>Εικόνα 1:</b> Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών (ECA) .....	56
<b>Εικόνα 2:</b> Τρισδιάστατη απεικόνιση επιφάνειας MATLAB .....	63
<b>Εικόνα 3:</b> Μέρος του κώδικα του υπολογιστικού εργαλείου (Στιγμιότυπο οθόνης) .....	64
<b>Εικόνα 4:</b> Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού εργαλείου- Απόσταση ταξιδιού (Στιγμιότυπο οθόνης) .....	69
<b>Εικόνα 5:</b> Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού εργαλείου- Απαίτηση μεταφερόμενου φορτίου (Στιγμιότυπο οθόνης) .....	69
<b>Εικόνα 6:</b> Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού εργαλείου- Θάλασσα λειτουργίας (Στιγμιότυπο οθόνης) .....	70
<b>Εικόνα 7:</b> Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού εργαλείου- Αριθμός πλοίων στόλου (Στιγμιότυπο οθόνης) .....	70
<b>Εικόνα 8:</b> Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού εργαλείου- Κύρια χαρακτηριστικά πλοίου (Στιγμιότυπο οθόνης) .....	70
<b>Εικόνα 9:</b> Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού εργαλείου- Χαρακτηριστικά κύριων και βοηθητικών μηχανών πλοίου (Στιγμιότυπο οθόνης) .....	71
<b>Εικόνα 10:</b> Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού εργαλείου- Εκπομπές πλοίου (Στιγμιότυπο οθόνης) .....	71
<b>Εικόνα 11:</b> Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού εργαλείου- Υπό εξέταση ρύπος (Στιγμιότυπο οθόνης) .....	72
<b>Εικόνα 12:</b> Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού εργαλείου- Τιμή κόστους διοξειδίου του άνθρακα (Στιγμιότυπο οθόνης) .....	72
<b>Εικόνα 13:</b> Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού εργαλείου- Κριτήριο (Στιγμιότυπο οθόνης) ..	72
<b>Εικόνα 14:</b> Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού εργαλείου- Τερματισμός υπολογιστικού εργαλείου (Στιγμιότυπο οθόνης) .....	72

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

API	Εφαρμογή Προγράμματος Διεπαφής ( <i>Application Program Interface</i> )
CALCAS	Συντονισμός δράσεων για την καινοτομία στην ανάλυση βιωσιμότητας κύκλου ζωής ( <i>Co-ordination Action for innovation in Life Cycle Analysis for Sustainability</i> )
CH <sub>4</sub>	Μεθάνιο ( <i>Methane</i> )
CO	Μονοξείδιο του άνθρακα ( <i>Carbon Monoxide</i> )
CO <sub>2</sub>	Διοξείδιο του άνθρακα ( <i>Carbon Dioxide</i> )
CO <sub>2e</sub>	Ισοδύναμο CO <sub>2</sub> ( <i>CO<sub>2</sub> equivalents</i> )
ECAs	Περιοχές ελέγχου εκπομπών ( <i>Emission Control Areas</i> )
EEDI	Δείκτης σχεδίασης ενεργειακής αποδοτικότητας ( <i>Energy Efficiency Design Index</i> )
EGR	Ανακυκλοφορία καυσαερίων ( <i>Exhaust Gas Recirculation</i> )
EIA	Υπηρεσία Διαχείρισης Ενεργειακών Πληροφοριών ( <i>Energy Information Administration</i> )
EMSA	Ευρωπαϊκός Οργανισμός για την Ασφάλεια στη Θάλασσα ( <i>European Maritime Safety Agency</i> )
EU	Ευρωπαϊκή Ένωση ( <i>European Union</i> )
ExternE	Εξωτερικότητες της Ενέργειας ( <i>Externalities of Energy</i> )
GHG	Αέρια του θερμοκηπίου ( <i>Greenhouse Gases</i> )
GWP	Δυναμικό παγκόσμιας θέρμανσης ( <i>Global Warming Potential</i> )
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Θειικό οξύ ( <i>Sulfuric Acid</i> )
HFO	Βαρύ καύσιμο ( <i>Heavy Fuel Oil</i> )
IMO	Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός ( <i>International Maritime Organization</i> )
IPA	Προσέγγιση δρόμου επιπτώσεων ( <i>Impact Pathway Approach</i> )
ISO	Διεθνής Οργανισμός Πιστοποίησης ( <i>International Organization for Standardization</i> )
LCA	Ανάλυση κύκλου ζωής ( <i>Life Cycle Assessment</i> )

LCC	Ανάλυση κόστους κύκλου ζωής ( <i>Life Cycle Cost</i> )
LCI	Καταγραφή δεδομένων κύκλου ζωής ( <i>Life Cycle Inventory</i> )
LCIA	Αξιολόγηση επιπτώσεων κύκλου ζωής ( <i>Life Cycle Impact Assessment</i> )
LCSA	Ανάλυση βιωσιμότητας κύκλου ζωής ( <i>Life Cycle Sustainability Analysis</i> )
LNG	Υγροποιημένο φυσικό αέριο ( <i>Liquefied Natural Gas</i> )
MARPOL	Διεθνής σύμβαση για την πρόληψη της ρύπανσης από πλοία ( <i>International Convention for the Prevention of Pollution from Ships</i> )
MATLAB	Εργαστήριο πινάκων – Πρόγραμμα ( <i>Matrix Laboratory – Software</i> )
MDO	Θαλάσσιο πετρέλαιο ντίζελ ( <i>Marine Diesel Oil</i> )
MEPC	Επιτροπή Προστασίας Θαλασσίου Περιβάλλοντος ( <i>Marine Environment Protection Committee</i> )
MRV	Παρακολούθηση- Αναφορά- Πιστοποίηση ( <i>Monitoring- Reporting Verification</i> )
N <sub>2</sub> O	Υποξείδιο του αζώτου ( <i>Nitrous Oxide</i> )
NECAs	Περιοχές ελέγχου των εκπομπών Αζώτου ( <i>Nitrous oxide Emission Control Areas</i> )
NMVOc	Μη μεθανικές πτητικές οργανικές ενώσεις ( <i>Non-methane Volatile Organic Compound</i> )
NO <sub>x</sub>	Οξειδία του αζώτου ( <i>Nitrogen Oxides</i> )
NO	Μονοξείδιο του αζώτου ( <i>Nitric Oxide</i> )
NTUA	Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, ΕΜΠ ( <i>National Technical University of Athens</i> )
O <sub>3</sub>	Όζον ( <i>Ozone</i> )
PAH	Πολυκυκλικοί Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες ( <i>Polycyclic Aromatic Hydrocarbons</i> )
PM	Μικροσωματίδια ( <i>Particulate Matter</i> )
SCR	Καταλυτική αναγωγή καυσαερίων ( <i>Selective Catalytic Reduction</i> )

SECAs	Περιοχές ελέγχου των εκπομπών θείου ( <i>Sulfur Emission Control Areas</i> )
SEEMP	Σχέδιο διαχείρισης της ενεργειακής επίδοσης πλοίου ( <i>Ship Energy Efficiency Management Plan</i> )
SETAC	Σύλλογος Περιβαλλοντικής Τοξικολογίας και Χημείας ( <i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i> )
S <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	Υποξείδιο του θείου ( <i>Lower Sulfur Oxides</i> )
S <sub>7</sub> O <sub>2</sub>	Υποξείδιο του θείου ( <i>Lower Sulfur Oxides</i> )
SO <sub>2</sub>	Διοξείδιο του θείου ( <i>Sulfur Dioxide</i> )
SO <sub>3</sub>	Τριοξείδιο του θείου ( <i>Sulfur Trioxide</i> )
SO <sub>3+x</sub>	Υπεροξείδια του θείου ( <i>Higher Sulfur Oxides</i> )
SO	Μονοξείδιο του θείου ( <i>Sulfur Monoxide</i> )
SO <sub>x</sub>	Οξείδια του θείου ( <i>Sulfur Oxides</i> )
UNITE	Ενοποίηση των λογαριασμών και του περιθωριακού κόστους για την αποδοτικότητα στον τομέα των μεταφορών ( <i>UNification of accounts and marginal costs for Transport Efficiency</i> )
VOC	Πτητικές Οργανικές Ενώσεις ( <i>Volatile Organic Compound</i> )

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

$B$	[m]	Πλάτος ( <i>Breadth</i> )
$C_B$		Συντελεστής γάστρας ( <i>Block Coefficient</i> )
$\Delta$	[tn]	Εκτόπισμα ( <i>Displacement</i> )
$D$	[m]	Κούλο ( <i>Depth</i> )
$DWT$	[tn]	Νεκρό βάρος πλοίου ( <i>Deadweight Tonnage</i> )
$EC$	[EUROS]	Εξωτερικό κόστος ( <i>External Cost</i> )
$EC_f$	[EUROS/tn]	Συντελεστής εξωτερικού κόστους ( <i>External Cost Factor</i> )
$EF$	[g/g fuel]	Συντελεστής ρύπου ( <i>Emission Factor</i> )
$FC$	[tn]	Κατανάλωση καυσίμου ( <i>Fuel Consumption</i> )
$L_{BP}$	[m]	Μήκος μεταξύ καθέτων ( <i>Length between perpendiculars</i> )
$LF$		Συντελεστής φόρτισης ( <i>Loading Factor</i> )
$LS$	[tn]	Βάρος άφορτου πλοίου ( <i>Lightship</i> )
$MCR$	[kW]	Μέγιστη συνεχόμενη ισχύς ( <i>Maximum Continuous Rate</i> )
$Payload$	[tn]	Ωφέλιμο φορτίο
$SFC$	[kg/kWh]	Ειδική κατανάλωση καυσίμου ( <i>Specific Fuel Consumption</i> )
$T$	[m]	Βύθισμα ( <i>Draft</i> )



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Η παρούσα διπλωματική εργασία με θέμα «Συγκριτική μελέτη της λειτουργίας στόλου με τη χρήση κριτηρίων βιωσιμότητας: Ανάπτυξη υπολογιστικού εργαλείου» εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του Αναπληρωτή Καθηγητή Δρ. Νικολάου Π. Βεντίκου στο πλαίσιο των προπτυχιακών σπουδών της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η σύγκριση και η βελτιστοποίηση στόλων πλοίων μεταφοράς ξηρού φορτίου (Bulk Carrier) με χρήση της μεθόδου Ανάλυσης Κύκλου Ζωής. Ως κριτήρια χρησιμοποιήθηκαν το σύνολο των αέριων εκπομπών, το εξωτερικό κόστος και το κόστος λειτουργίας. Με βάση τα παραπάνω γίνεται εφικτός ο υπολογισμός του βέλτιστου συνδυασμού πλοίων με σκοπό την ελαχιστοποίηση των υπό μελέτη μεγεθών, ώστε για μια συγκεκριμένη θαλάσσια διαδρομή να καλύπτεται η ζήτηση σε συγκεκριμένο ξηρό φορτίο χύδην από τους υπό εξέταση στόλους. Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκε υπολογιστικό εργαλείο που, υπολογίζοντας το εξωτερικό κόστος και το κόστος λειτουργίας ενός στόλου αποτελούμενου από Bulk Carriers, εμφανίζει τον βέλτιστο συνδυασμό πλοίων του στόλου που απαιτείται να χρησιμοποιηθούν, ενώ παράλληλα υπολογίζει και παρουσιάζει επιπρόσθετα συναφή αποτελέσματα με βάση τους ισχύοντες κανονισμούς.

Για την ανάπτυξη του προγράμματος χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής MATLAB που αποτελεί, ταυτόχρονα, μια προγραμματιστική γλώσσα τέταρτης γενιάς. Το υπολογιστικό πρόγραμμα που αναπτύχθηκε λειτουργεί σαν διαδραστικό εργαλείο το οποίο, μέσω κατάλληλα διαμορφωμένων πλαισίων διαλόγου στην αγγλική γλώσσα, λαμβάνει τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου από τον χρήστη και εξάγει τα ζητούμενα αποτελέσματα, με βάση τις παραμέτρους που τίθενται κάθε φορά.

Τα απαιτούμενα δεδομένα εισόδου αφορούν στα βασικά χαρακτηριστικά των πλοίων, στα χαρακτηριστικά των μηχανών τους, στις αέριες εκπομπές τους, καθώς και στα στοιχεία της υπό εξέταση θαλάσσιας διαδρομής. Στα αποτελέσματα που εξάγονται, πέραν του βέλτιστου συνδυασμού πλοίων, συμπεριλαμβάνονται τα δεδομένα που απαιτείται να καταγράφονται σύμφωνα με τον Κανονισμό (ΕΥ) 2015/757 της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Κανονισμός Παρακολούθησης – Αναφοράς – Πιστοποίησης/ *Monitoring – Reporting – Verification, MRV*), ενώ παράλληλα υπολογίζονται και εμφανίζονται στοιχεία που αφορούν άλλους κανονισμούς σχετικούς με τις αέριες εκπομπές των πλοίων, όπως είναι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) ανά τονομίλι και οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) ανά κιλοβατώρα. Όλα τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε πίνακες για την ευκολότερη

κατανόηση και περαιτέρω επεξεργασία τους, ενώ παράλληλα σχεδιάζονται χρήσιμα γραφήματα.

Στη συνέχεια της εργασίας παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του υπολογιστικού προγράμματος για δύο στόλους Bulk Carrier, που εκτελούν δρομολόγια μεταξύ Αυστραλίας και Κίνας. Διευρύνοντας το πεδίο της έρευνας εξετάζονται δύο εναλλακτικά σενάρια ταχυτήτων των πλοίων και αναλύονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη χρήση τριών ειδών καυσίμων (Heavy Fuel Oil, Marine Diesel Oil, Liquefied Natural Gas). Τέλος, γίνεται αναγωγή των αποτελεσμάτων στο χρόνο ζωής των πλοίων (ο οποίος ορίζεται ως 20 έτη).

**Λέξεις – κλειδιά:** αέριες εκπομπές, εξωτερικό κόστος, κόστος λειτουργίας, στόλος πλοίων, πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου, ανάλυση βιωσιμότητας κύκλου ζωής, ταξινόμηση πλοίων, βελτιστοποίηση

# ABSTRACT

---

This Thesis, entitled “Design of computational platform for the comparative assessment of vessels’ operations on fleet-wide basis with respect to sustainability criteria”, was developed within the field of undergraduate studies at the Naval Architecture and Marine Engineering department of the National Technical University of Athens, under the supervision of the Associate Professor Dr. Nikolaos P. Ventikos.

The subject of this research is the comparison and optimization of dry Bulk Carriers using the Life Cycle Assessment method. Gas emissions, external cost and operating cost were used as criteria. Based on the above, it is possible to calculate the optimal combination of ships, in order to minimize the sizes under consideration, so that for a particular sea route the demand in a specific bulk cargo is covered by the fleets under consideration. Therefore, a computational platform was developed for the calculation of the external and operational cost of a Bulk Carrier fleet, displaying the optimal combination of ships to constitute the fleet and providing further results in accordance with the applicable regulations.

The fourth-generation programming language and numerical computing environment MATLAB was used for the development of the platform. The platform operates as an interactive tool which, through appropriately configured dialog boxes written in English, receives the necessary input data from the user and outputs the requested results according to the parameters set for each inquiry.

The required input data relate to the basic characteristics of the ships, the specifications of their engines, their gaseous emissions and the features of the sea-region under consideration. The exported results provide the optimal combination of ships to operate, along with data required to be recorded in accordance with the European Union Regulation (EU) 2015/757 (Monitoring – Reporting – Verification, MRV) and other regulations related to the gaseous emissions of ships, such as the amount of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions per ton-mile and the oxides of nitrogen (NO<sub>x</sub>) emissions per kilowatt hour. All results are saved in matrices in order to be intelligible and their further processing to be feasible, while they are also presented in graphs and charts.

In the last part of this Thesis, the results derived from using the above-mentioned platform to assess two Bulk Carrier fleets operating a sea-route between Australia and China are presented. In order to enhance the framework of research, two alternative scenarios for the ships’ speed and three distinct types of bunker fuels consumed (Heavy Fuel Oil, Marine Diesel Oil, Liquefied Natural Gas) are investigated.

Finally, the exported results are converted and analyzed on the basis of the vessels' lifecycle, which is considered to be 20 years of operation.

**Keywords:** emissions, external costs, operating costs, fleet, Bulk Carrier vessels, lifecycle sustainability analysis, optimization analysis.

# 1. Εισαγωγή

Οι αέριες εκπομπές των πλοίων έχουν απασχολήσει πολλούς ερευνητές τις τελευταίες δεκαετίες, καθώς φαίνεται ότι αποτελεί ένα πρόβλημα αυξανόμενης σημασίας. Οι έρευνες έχουν αποδείξει ότι η ναυτιλιακή δραστηριότητα αποτελεί σημαντική πηγή της ατμοσφαιρικής ρύπανσης ιδιαίτερα στις παράκτιες περιοχές επηρεάζοντας την ποιότητα του αέρα, το παγκόσμιο κλίμα, το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία (Papanastasiou and Melas, 2009; Chen et al., 2017; Tzannatos, 2009; Chatzinikolaou et al., 2015).

Σύμφωνα με τις τελευταίες έρευνες του Διεθνούς Οργανισμού Ναυσιπλοΐας (International Maritime Organization, *IMO*) στην περίπτωση των αερίων του θερμοκηπίου, η ναυτιλιακή δραστηριότητα συμβάλλει σε ένα ποσοστό της τάξης του 3.1 % των παγκόσμιων εκπομπών. Παρ' όλα αυτά δεν μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες, καθώς πρόσφατες εκτιμήσεις (*IMO*, 2014) έχουν δείξει ότι οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τη ναυτιλιακή δραστηριότητα αναμένεται να αυξηθούν από 50% μέχρι 250% έως το 2050. Ο Πίνακας 1 Πίνακας 1 και ο Πίνακας 2 αναφέρονται στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ( $CO_2$ ) από τη ναυτιλιακή δραστηριότητα κατά την πενταετία 2007-2012.

**Εκπομπές  $CO_2$**

Year	Global $CO_2$	Total Shipping	% of global
2007	31409	1100	3.5%
2008	32204	1135	3.5%
2009	32047	978	3.1%
2010	33612	915	2.7%
2011	34723	1022	2.9%
2012	35640	938	2.6%
<b>Average</b>	33273	1015	3.1%

Πίνακας 1: Εκπομπές  $CO_2$  2007-2012 (*IMO*, 2014)

**Εκπομπές  $CO_2e$**

Year	Global $CO_2$	Total Shipping	% of global
2007	34881	1121	3.2%
2008	35677	1157	3.2%
2009	35519	998	2.8 %
2010	37085	935	2.5%
2011	38196	1045	2.7%
2012	39113	961	2.5%
<b>Average</b>	36745	1036	2.8%

Πίνακας 2: Εκπομπές  $CO_2e$  2007-2012 (*IMO*, 2014)

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα διάφορα αέρια του θερμοκηπίου (Greenhouse Gases, GHG), όπως είναι το διοξείδιο του θείου (CO<sub>2</sub>), το υποξείδιο του αζώτου (N<sub>2</sub>O) και το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>), επιδρούν στην ατμόσφαιρα για διαφορετική χρονική διάρκεια απορροφώντας διαφορετική ποσότητα θερμότητας. Το δυναμικό παγκόσμιας θέρμανσης (Global Warming Potential, GWP) κάθε GHG υποδεικνύει την ποσότητα απορρόφησης θερμότητας του αερίου για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο (συνήθως 100 χρόνια) (Brander, 2012). Σύμφωνα με έρευνες (IPCC, 2007), το GWP του CO<sub>2</sub> είναι ίσο με 1, συνεπώς τα GWP των υπολοίπων αερίων του θερμοκηπίου αντικατοπτρίζουν πόσο περισσότερο, σε σύγκριση με το CO<sub>2</sub>, συμβάλλουν στην παγκόσμια υπερθέρμανση. Τελικά, πολλαπλασιάζοντας την ποσότητα του GHG με τον αντίστοιχο GWP είναι δυνατό να εκφραστούν όλα τα αέρια του θερμοκηπίου σε μία κοινή μονάδα, γνωστή ως «ισοδύναμο του διοξειδίου του άνθρακα» (Carbon dioxide equivalent, CO<sub>2</sub>e).

Επιπλέον, σύμφωνα με τον IMO (2014), σημειώνεται ότι οι υπόλοιπες αέριες εκπομπές, όπως το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), οι μη μεθανικές πτητικές οργανικές ενώσεις (NMVOC), και το υποξείδιο του αζώτου αναμένεται να αυξηθούν σε αναλογία με τις εκπομπές CO<sub>2</sub>. Η αύξηση των εκπομπών του μεθανίου αναμένεται να είναι ραγδαία, γεγονός που οφείλεται στην αύξηση της χρήσης του LNG ως καύσιμη ύλη. Αντίθετα, οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) προβλέπεται να αυξηθούν σε μικρότερο βαθμό λόγω των κανονισμών που έχουν επιβληθεί οδηγώντας σε αύξηση της χρήσης των μηχανών τύπου Tier II και Tier III στα πλοία. Τέλος, οι εκπομπές μικροσωματιδίων (PM) αναμένεται να παρουσιάσουν απόλυτη μείωση έως το 2020 και οι εκπομπές οξειδίων του θείου (SO<sub>x</sub>) αναμένεται να συνεχίσουν να μειώνονται έως το 2050, κυρίως λόγω των απαιτήσεων της MARPOL Annex VI σχετικά με την περιεκτικότητα σε θείο των καυσίμων.

Παράλληλα, οι αέριες εκπομπές των πλοίων έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Ενδεικτικά, οι εκπομπές μικροσωματιδίων (PM) από τα πλοία συνδέονται με περίπου 60.000 πρώιμους θανάτους ετησίως, ιδιαίτερα σε παράκτιες κατοικημένες περιοχές, όπως η Ανατολική και Νότια Ασία και η Ευρώπη (Corbett et al., 2007).

Από την άλλη πλευρά, οι μεταφορικές ανάγκες συνδέονται άρρηκτα με την παγκόσμια οικονομία, η οποία τα τελευταία χρόνια παρουσιάζει σταδιακή ανάπτυξη, οδηγώντας σε αύξηση του παγκόσμιου θαλάσσιου εμπορίου (UNCTAD, 2017). Ο Πίνακας 3 αναφέρεται στην ανάπτυξη του διεθνούς θαλασσιού εμπορίου από το 1970 έως το 2016.

**Growth in international seaborne trade  
(Millions of tons loaded)**

Year	Oil and Gas	Main bulks	Dry cargo other than main bulks	Total (all cargoes)
1970	1440	448	717	2605
1970	1871	608	1225	3704
1990	1755	988	1265	4008
2000	2163	1295	2526	5984
2005	2422	1709	2978	7109
2006	2698	1814	3188	7700
2007	2747	1953	3334	8034
2008	2742	2065	3422	8229
2009	2642	2085	3131	7858
2010	2772	2335	3302	8409
2011	2794	2486	3505	8785
2012	2841	2742	3614	9197
2013	2829	2923	3762	9514
2014	2825	2958	4033	9843
2015	2932	3121	3971	10023
2016	3055	3172	4059	10287

Πίνακας 3: Ανάπτυξη του διεθνούς θαλασσιού εμπορίου (UNCTAD, 2017)

Ως απάντηση σε όλα τα παραπάνω αναμένεται η υιοθέτηση ακόμα αυστηρότερων κανονισμών, όσον αφορά τις αέριες εκπομπές από την ναυτιλιακή δραστηριότητα, καθώς και η αύξηση της χρήσης νέων, φιλικότερων προς το περιβάλλον καυσίμων. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός για την Ασφάλεια στη Θάλασσα (European Maritime Safety Agency, EMSA) εξέδωσε πρόσφατα Οδηγίες προς τις Λιμενικές Αρχές και τις Διοικήσεις Κρατών για τον ανεφοδιασμό LNG σε Ευρωπαϊκά λιμάνια, με στόχο την αύξηση της ασφάλειας και της βιωσιμότητας (EMSA, 2018).

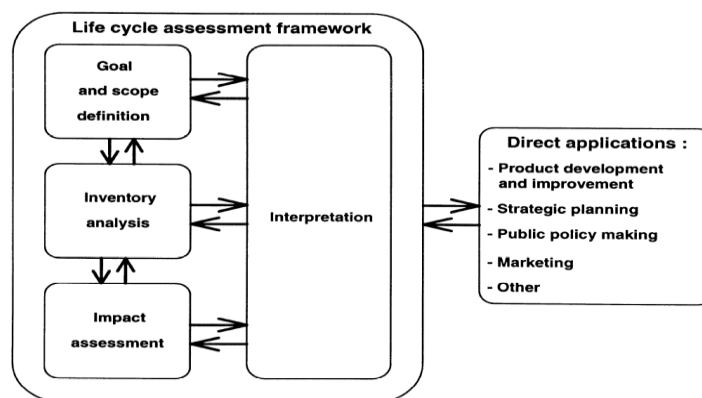
## 2. Ανάλυση Κύκλου Ζωής

### 2.1 Life Cycle Assessment (LCA)

Οι κλιματικές αλλαγές των τελευταίων δεκαετιών δημιούργησαν την ανάγκη για μέτρηση και βελτιστοποίηση των επιπτώσεων της λειτουργίας του πλοίου στο περιβάλλον. Με σκοπό, λοιπόν, την ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός πλοίου είναι σημαντική η μελέτη και η καταγραφή των αερίων εκπομπών του. Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης μελέτης χρησιμοποιείται η μέθοδος Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment, LCA), η οποία εξελίσσεται συνεχώς τις τελευταίες τρεις δεκαετίες (Guinée et al., 2011).

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 (Δασκαλάκης, 2015). Η μέθοδος Ανάλυσης Κύκλου Ζωής μελετά τις περιβαλλοντικές πτυχές και τις δυνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός προϊόντος μέσα από τον κύκλο ζωής του, δηλαδή από την απόκτηση των ακατέργαστων υλών στην παραγωγή, τη χρήση έως το τέλος της ζωής του προϊόντος, την ανακύκλωση και την τελική διάλυση (ISO 14040, ISO 14044).

Η μέθοδος LCA έχει ως στόχο την ποσοτικοποίηση των συνεπειών του προϊόντος ή της διαδικασίας στο περιβάλλον, εστιάζοντας στα στάδια της ζωής του, τα οποία θεωρούνται ότι είναι άμεσα εξαρτώμενα μεταξύ τους. Με αυτό τον τρόπο παρέχει κριτήρια που εξυπηρετούν την εκτίμηση των ενδεχόμενων περιβαλλοντικών επιπτώσεων για ένα συγκεκριμένο προϊόν προβλέποντας την επίδρασή του στο περιβάλλον. Επιπλέον, όταν πρόκειται για την επιλογή μεταξύ δύο προϊόντων, η μέθοδος LCA είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί παρέχοντας πραγματικά στοιχεία για την σύγκρισή τους (Blanco-Davis and Zhou, 2016).



Σχήμα 1: Τα στάδια της μεθόδου LCA (ISO 14040,1997)



Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, διακρίνεται σε τέσσερις επιμέρους φάσεις, σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040 και ISO 14044:

- Καθορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής.  
Η πρώτη φάση αφορά τον ακριβή προσδιορισμό τού υπό μελέτη προϊόντος ή διαδικασίας, καθώς και του στόχου της ίδιας της μελέτης. Επιπρόσθετα, σε αυτή τη φάση ορίζεται με σαφήνεια το γενικό πλαίσιο της μελέτης, αλλά και τα όρια της, δηλαδή το εύρος εισροών και εκροών που θα αναλυθούν.
- Καταγραφή δεδομένων κύκλου ζωής (*Life Cycle Inventory, LCI*).  
Στη συγκεκριμένη φάση, συλλέγονται και καταγράφονται οι εισροές και οι εκροές του συστήματος κατά τη διάρκεια της ζωής του. Η διαδικασία της καταγραφής και της ανάλυσης των δεδομένων συχνά απαιτείται να επαναληφθεί, εφόσον κατά τη διάρκειά της είναι δυνατό να προκύψουν νέα στοιχεία προς ανάλυση.
- Αξιολόγηση επιπτώσεων κύκλου ζωής (*Life Cycle Impact Assessment, LCIA*).  
Στην τρίτη φάση, τα στοιχεία που καταγράφηκαν στο προηγούμενο βήμα αξιολογούνται για πιθανές συνέπειες τόσο στον άνθρωπο, όσο και στο περιβάλλον.
- Ερμηνεία των αποτελεσμάτων.  
Στην τελευταία φάση, γίνεται ο συνδυασμός και η εκτίμηση των αποτελεσμάτων που έχουν προκύψει από τις προηγούμενες διαδικασίες. Με γνώμονα πάντα τον στόχο που είχε τεθεί στο πρώτο στάδιο της μελέτης, εξάγονται τα ανάλογα αποτελέσματα.

## 2.2 Ανάλυση Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (LCSA)

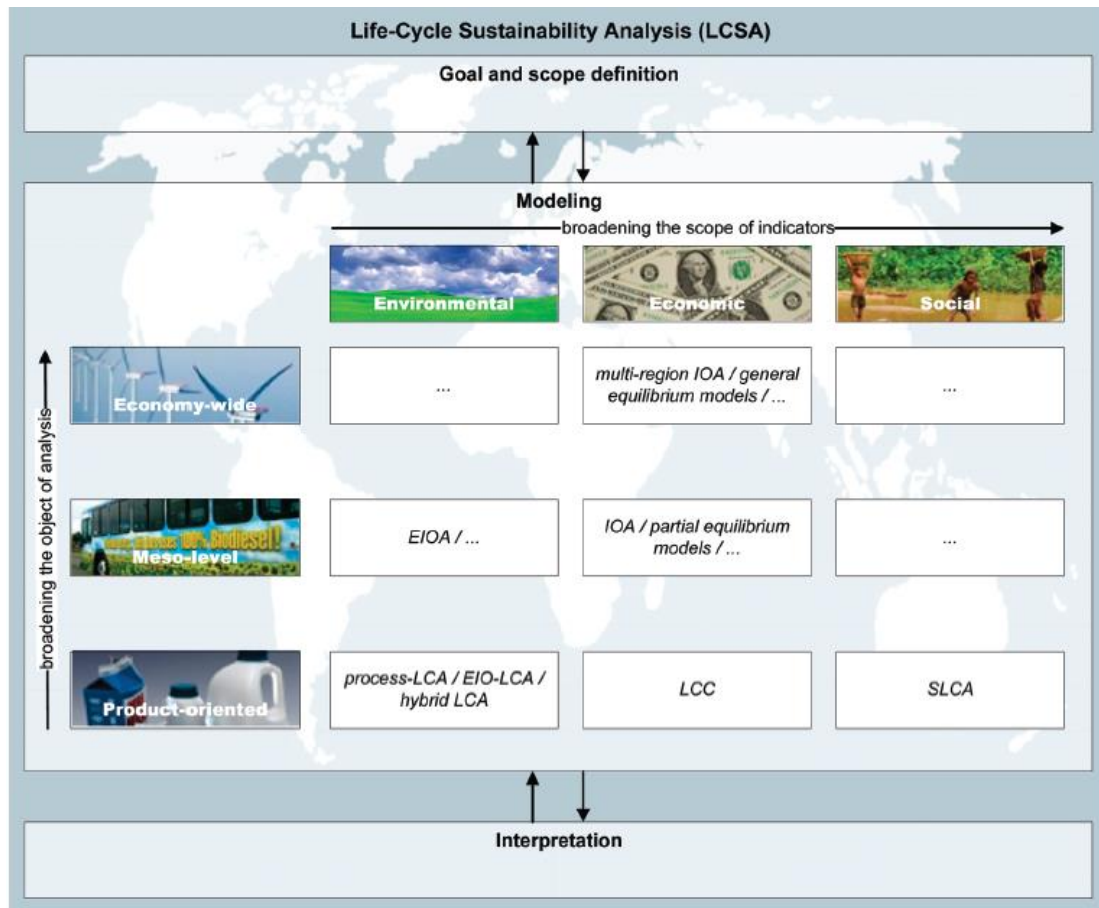
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η μέθοδος Ανάλυσης Κύκλου Ζωής εξελίχθηκε ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια διευρύνοντας τόσο τις δυνατότητές της όσο και τα πεδία στα οποία χρησιμοποιείται. Τις δεκαετίες του 1960 και 1970 εμφανίστηκαν οι πρώτες έρευνες που αφορούσαν τις συνέπειες των καταναλωτικών προϊόντων στο περιβάλλον. Η παραδοχή ότι οι περισσότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός προϊόντος βρίσκονταν στην διαδικασία της παραγωγής, μεταφοράς και διάλυσής του, παρά στη χρήση του, υπογράμμισε την ανάγκη της ακριβούς αποτύπωσης του κύκλου ζωής του και των συνεπειών του, οδηγώντας στην εγκαθίδρυση της μεθόδου LCA.

Μετά τις δεκαετίες του 1980 και 1990, η δημοσιότητα και η αποδοχή της μεθόδου αυξήθηκε, καθώς αποτέλεσε βασικό εργαλείο για την περιβαλλοντική πολιτική

πολλών κυβερνήσεων παγκοσμίως (Guinée et al., 2011). Ο Σύλλογος Περιβαλλοντικής Τοξικολογίας και Χημείας (Society of Environmental Toxicology and Chemistry, SETAC) ηγήθηκε της συνεργασίας μεταξύ χρηστών της μεθόδου LCA και επιστημόνων με στόχο τη βελτίωσή της. Το έργο του ακολούθησε ο Διεθνής Οργανισμός Πιστοποίησης (ISO) εισάγοντας τα δύο διεθνή πρότυπα ISO 14040 και ISO 14044. Τα πρότυπα που εισήγαγε ο ISO στοχεύουν στον ορισμό ενός γενικού πλαισίου εργασίας και όχι στην τυποποίηση μιας συγκεκριμένης μεθόδου (ISO 14040), γεγονός που είχε ως αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση των μεθόδων LCA που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πρώτη δεκαετία του εικοστού αιώνα. Η Δυναμική Ανάλυση Κύκλου Ζωής (dynamic LCA), η Ανάλυση Ρίσκου του Κύκλου Ζωής (risk-based LCA), η Ανάλυση Κύκλου Κοινωνικής Ζωής (social LCA), καθώς και το Κόστος Κύκλου Ζωής (Life Cycle Cost, LCC) αποτελούν μερικές από τις διαφοροποιημένες μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια αυτής της δεκαετίας.

Η Ανάλυση Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (Life Cycle Sustainability Analysis, LCSA) εγκαθιδρύθηκε από το πρόγραμμα CALCAS (Co-ordination Action for innovation in Life Cycle Analysis for Sustainability), πρόγραμμα το οποίο χρηματοδότησε η Ευρωπαϊκή Επιτροπή το 2006 με στόχο την ανασκόπηση των βασικότερων μεθόδων και την περαιτέρω ανάπτυξη της LCA («<https://lca-net.com/projects/show/calcas/>»). Η LCSA θεωρείται ως το μέλλον της LCA, καθώς διευρύνει το πεδίο εφαρμογής της από τις περιβαλλοντικές συνέπειες σε όλες τις τρεις διαστάσεις της βιωσιμότητας (κοινωνία, οικονομία και περιβάλλον) (Guinée et al., 2011).

Στην μέθοδο LCSA, τα βήματα της LCA που αφορούν στην καταγραφή δεδομένων (Inventory Analysis) και αξιολόγηση των επιπτώσεων (Impact Assessment) (Σχήμα 1), συγχωνεύονται σε ένα βήμα, αυτό της μοντελοποίησης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2. Στον κάθετο άξονα παρουσιάζονται τα τρία επίπεδα στα οποία μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος LCSA. Το πρώτο επίπεδο (product-oriented) αναφέρεται σε κάθε προϊόν ή διαδικασία όπως περιγράφεται από το ISO 14040 και ISO 14044. Το δεύτερο επίπεδο (meso-level) βρίσκεται μεταξύ του προϊόντος και της οικονομίας και μπορεί να περιλαμβάνει ομάδες σχετικών προϊόντων και τεχνολογιών, το δήμο ή ένα νοικοκυριό. Τέλος, το τρίτο επίπεδο (economy-wide) αναφέρεται στις οικονομίες κρατών ή άλλων πολιτικών ή γεωγραφικών ομάδων και τελικά στην παγκόσμια οικονομία. Στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζονται οι δείκτες βιωσιμότητας (περιβάλλον, οικονομία, κοινωνία) στους οποίους βασίζεται η ανάλυση. Ανάλογα με το πόσο ολοκληρωμένη γίνεται κάποια έρευνα, η ανάλυση μπορεί να βασιστεί σε ένα δείκτη βιωσιμότητας ή ακόμα και στους τρεις βασικούς πυλώνες της βιώσιμης ανάπτυξης.



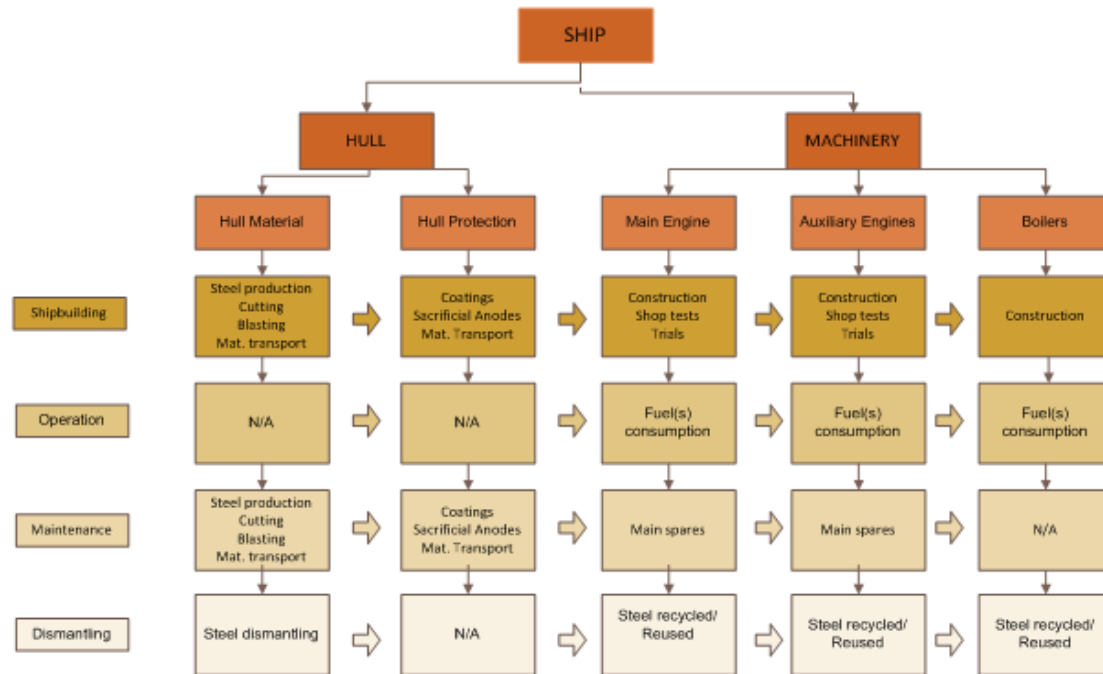
Σχήμα 2: Πεδίο εφαρμογής της μεθόδου LCSA (Guinée et al., 2011)

## 2.3 Ανάλυση Κύκλου Ζωής πλοίου

Όσον αφορά τον τομέα των θαλασσίων μεταφορών, η μέθοδος LCA άρχισε να εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990, με στόχο την καταγραφή του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του πλοίου κατά τη διάρκεια της ζωής του (Chatzinikolaou and Ventikos, 2015). Οι διάφορες μελέτες που ακολούθησαν παρουσιάζουν ποικιλία, τόσο στη σκοπιά από την οποία εξετάζεται το σύστημα του πλοίου και τα διάφορα υποσυστήματα στα οποία είναι δυνατό να διαχωριστεί (π.χ. γάστρα, μηχανολογική εγκατάσταση, εξοπλισμός φορτίου, υπερκατασκευές κ.α.), όσο και στους στόχους τους.

Η εξέλιξη της μεθόδου LCA είχε ως αποτέλεσμα την ευρεία χρήση της στη ναυπηγική, σε έρευνες που αφορούν τη διαδικασία σχεδιασμού προϊόντων και κατασκευής τους, τις μεταφορές και την αλιεία, τις εναλλακτικές πηγές ενέργειας και τα καύσιμα, καθώς και την αξιολόγηση συστημάτων του πλοίου και της μηχανολογικής εγκατάστασής του.

Το Εργαστήριο Θαλάσσιων Μεταφορών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (National Technical University of Athens, *NTUA*) έχει πραγματοποιήσει μελέτες με την μέθοδο Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν τις ναυτιλιακές δραστηριότητες (Daskalakis et al., 2015).



Σχήμα 3: Δομή συστήματος ανάλυσης κύκλου ζωής πλοίου (Chatzinikolaou and Ventikos, 2015)

Σύμφωνα με το Σχήμα 3, το πλοίο αναλύεται σε δύο υποσυστήματα (γάστρα και μηχανολογική εγκατάσταση), καθένα από τα οποία μελετάται ξεχωριστά στο κύκλο ζωής του, ο οποίος διακρίνεται σε τέσσερα στάδια:

- Κατασκευή
- Λειτουργία
- Συντήρηση
- Διάλυση

## 2.4 Παραδείγματα μελετών LCA στη ναυτιλία

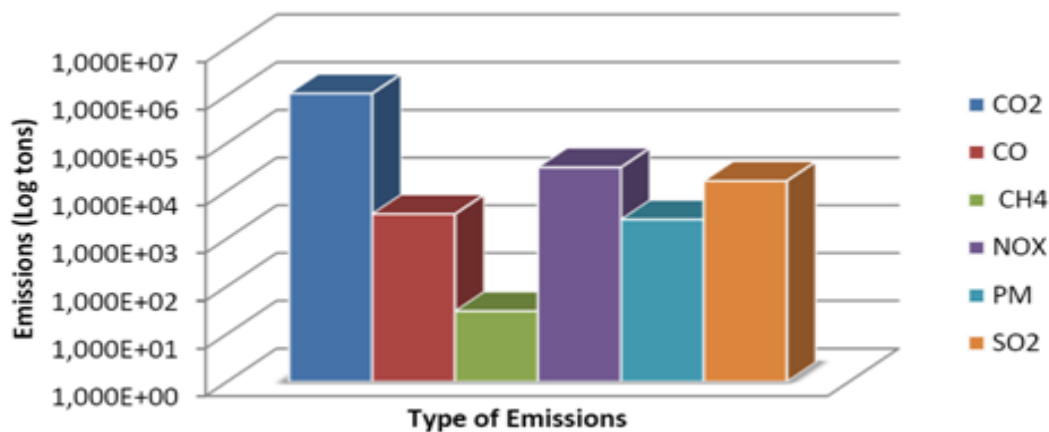
Με βάση την παραπάνω ανάλυση του συστήματος του πλοίου και του κύκλου ζωής του, πραγματοποιήθηκαν μελέτες, ως αντικείμενο διπλωματικών εργασιών, που εξετάζουν τα δύο επιμέρους υποσυστήματα, αλλά και το πλοίο ως ολότητα. Στη συνέχεια περιγράφονται τρία παραδείγματα μελετών και παρουσιάζονται επιγραμματικά τα αποτελέσματά τους.

- Στην πρώτη (Μαντάκος, 2012), μελετάται η μηχανολογική εγκατάσταση ενός πλοίου Tanker, 74296 DWT. Η συνολική ισχύς της μηχανολογικής

εγκατάστασης, από τις κύριες και βοηθητικές μηχανές, ανέρχεται στα 14460 kW. Στα πλαίσια της μελέτης εξετάστηκαν τέσσερα σενάρια λειτουργίας:

1. Σενάριο κανονικής λειτουργίας (πραγματικά στοιχεία δρομολογίων)
2. Σενάριο λειτουργίας Slow Steaming
3. Σενάριο λειτουργίας Cold Ironing
4. Σενάριο περιορισμού ταχύτητας

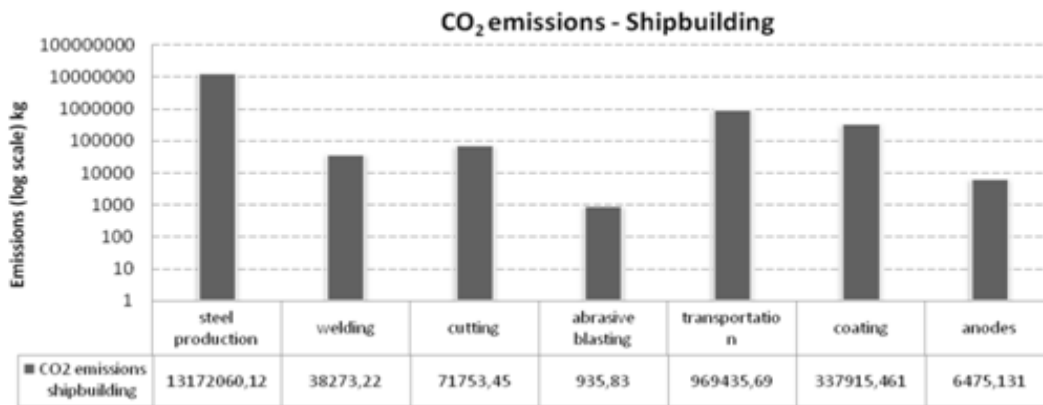
Στο Διάγραμμα 1 φαίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τη μελέτη του σεναρίου κανονικής λειτουργίας.



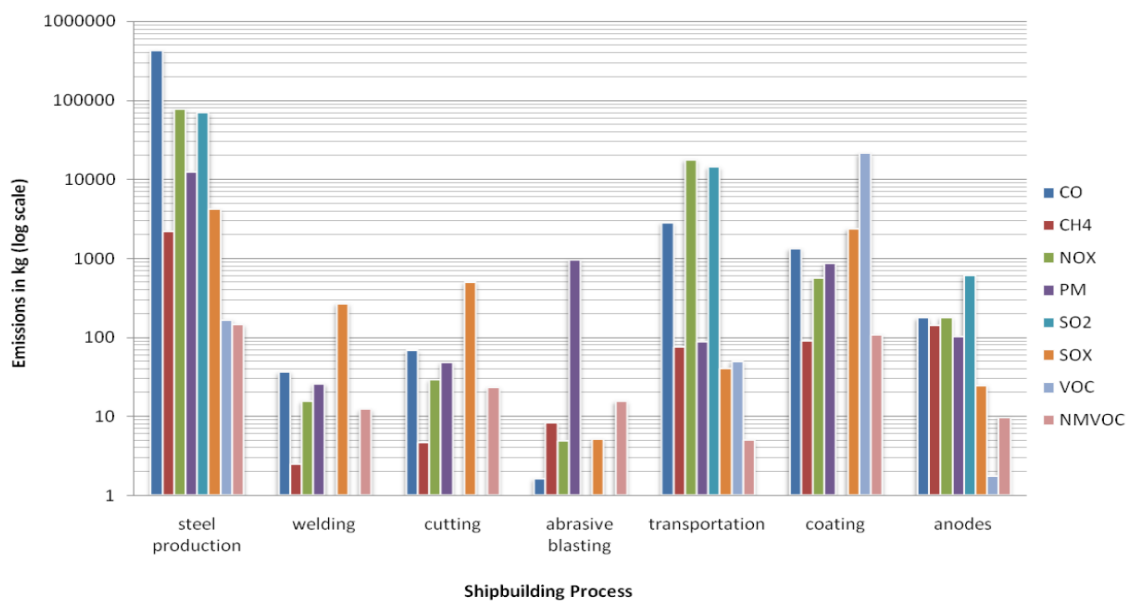
**Διάγραμμα 1:** Εκπομπές μηχανολογικής εγκατάστασης κατά την κανονική λειτουργία του πλοίου (Μαντάκος, 2012)

- Στη δεύτερη (Ρουμελιώτη, 2013), μελετάται η μεταλλική κατασκευή του ίδιου πλοίου. Το σενάριο λειτουργίας που εξετάστηκε είναι η κυκλική εκτέλεση του δρομολογίου Novorossiysk (Russia)-Augusta (Italy), απόστασης 2464 ναυτικών μιλίων. Ενώ, η διάρκεια ταξιδιού αποτελείται από το χρόνο που το πλοίο βρίσκεται εν πλω και εν όρμω, δηλαδή 16.67 και 3 ημέρες αντίστοιχα. Η διάρκεια ζωής του πλοίου θεωρείται ίση με 25 χρόνια, εκτελώντας τελικά 422 ταξίδια μέχρι την απόσυρσή του. Τέλος, τα στάδια που εξετάζονται διακρίνονται σε δύο υποενότητες: τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή και τις διεργασίες που πραγματοποιούνται για την προστασία της.

Όπως προέκυψε από την μελέτη κατά τη φάση παραγωγής του χάλυβα προκύπτουν οι περισσότερες εκπομπές τόσο σε CO<sub>2</sub>, όσο και σε CO, PM και CH<sub>4</sub> (Ρουμελιώτη, 2013).



**Διάγραμμα 2:** Εκπομπές CO<sub>2</sub> στη φάση της κατασκευής (Ρουμελιώτη, 2013)



**Διάγραμμα 3:** Εκπομπές CO, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, PM, SO<sub>2</sub>, VOC, SO<sub>x</sub> και NMVOC στη φάση της κατασκευής (Ρουμελιώτη, 2013)

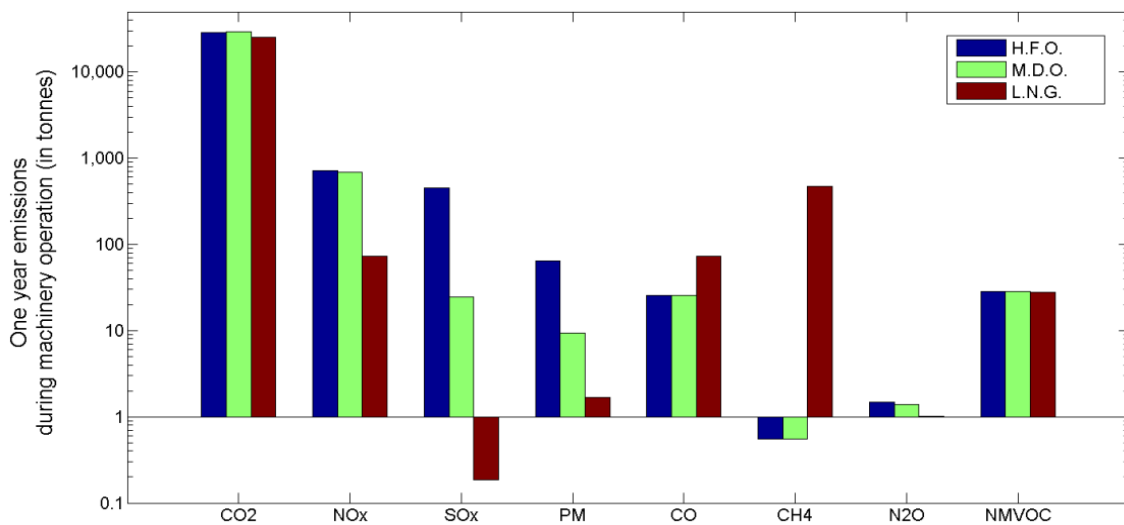
Από το Διάγραμμα 2 και το Διάγραμμα 3 συμπεραίνεται ότι περισσότερες είναι οι εκπομπές σε CO<sub>2</sub>, ιδιαίτερα κατά της φάσης της παραγωγής του χάλυβα, όπως ήδη επισημάνθηκε, ενώ ακολουθούν οι διαδικασίες για τη μεταφορά και τη βαφή του.

- Στην τρίτη (Δασκαλάκης, 2015), μελετάται ο κύκλος ζωής του πλοίου τόσο σε επίπεδο μεταλλικής κατασκευής, όσο και σε επίπεδο γάστρας, με στόχο την καταγραφή του αέριων εκπομπών του. Στη συγκεκριμένη μελέτη αναπτύχθηκε υπολογιστικό πρόγραμμα, το οποίο εφαρμόζει τη μέθοδο Ανάλυσης Κύκλου Ζωής σε φορτηγά πλοία τύπου Bulk Carrier.

Το υπολογιστικό εργαλείο εφαρμόστηκε σε πλοίο Bulk Carrier Capesize 206104 DWT, το οποίο φέρει μία αργόστροφη κύρια μηχανή 18660 kW και 3 βοηθητικές 900 kW. Όσον αφορά το σενάριο λειτουργίας της μηχανολογικής

εγκατάστασης, υπολογίστηκαν οι αέριες εκπομπές από εικοσιένα ταξίδια που πραγματοποίησε το πλοίο κατά τη διάρκεια ενός έτους, εξυπηρετώντας δρομολόγια Αυστραλίας-Κίνας. Σημειώνεται ότι το πρόγραμμα παράγει αποτελέσματα για τη χρήση τριών διαφορετικών καυσίμων (HFO, MDO, LNG).

Στο Διάγραμμα 4 παρουσιάζονται οι αέριες εκπομπές κατά τη λειτουργία ενός έτους, στη διάρκεια του οποίου το πλοίο κάλυψε συνολικά απόσταση 63105 ναυτικών μιλίων. Εκτιμάται ότι καταναλώθηκαν συνολικά 9232 τόνοι καυσίμου, από τους οποίους οι 8033 τόνοι καταναλώθηκαν από τις κύριες μηχανές.



**Διάγραμμα 4:** Αέριες εκπομπές κατά τη διάρκεια ενός έτους λειτουργίας (Δασκαλάκης, 2015)

Παρατηρείται ότι οι εκπομπές CO<sub>2</sub> είναι υψηλές ανεξάρτητα από το είδος καυσίμου. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση του LNG δίνει εξαιρετικά μειωμένες τιμές οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και του θείου (SO<sub>x</sub>), σε σχέση με τα βαριά καύσιμα HFO, με τις δεύτερες να είναι σχεδόν μηδενικές. Παράλληλα, όμως, παρουσιάζονται ιδιαίτερα αυξημένες οι εκπομπές CH<sub>4</sub>, γεγονός που δικαιολογείται από την μεγάλη περιεκτικότητα του LNG σε μεθάνιο, η οποία αγγίζει το 94-95% της σύστασής του (Δασκαλάκης, 2015).

## 3. Αέριες εκπομπές από τη ναυτιλιακή δραστηριότητα

---

Οι θαλάσσιες μεταφορές διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στη βιωσιμότητα του τομέα των μεταφορών, όμως, παράλληλα έχουν σημαντική συνεισφορά στην ατμοσφαιρική ρύπανση και στην επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου (Miola and Ciuffo, 2011).

Σύμφωνα με έρευνες (Mathias et al., 2010), οι αέριες εκπομπές από τη λειτουργία των πλοίων έχουν σημαντικές επιπτώσεις στα επίπεδα συγκεντρώσεων σημαντικών ρύπων στην ατμόσφαιρα, ιδίως στις παράκτιες περιοχές.

Για τον λόγο αυτό, οι πολιτικές δράσεις για τον περιορισμό των εκπομπών από τη ναυτιλιακή δραστηριότητα αυξάνονται διαρκώς τις τελευταίες δεκαετίες, όμως ο σχεδιασμός και η εφαρμογή αποτελεσματικών δράσεων απαιτούν, τόσο τον ακριβή προσδιορισμό των αερίων εκπομπών, όσο και ακριβείς εκτιμήσεις για την ποσοτικοποίηση τους.

### 3.1 Κύριες αέριες εκπομπές

Για την καλύτερη κατανόηση των επιδράσεων της ναυτιλιακής δραστηριότητας στον άνθρωπο και στο περιβάλλον, στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι κύριες αέριες εκπομπές που οφείλονται σε αυτήν, καθώς και οι άμεσες και έμμεσες συνέπειές τους.

#### **Μικροσωματίδια (PM)**

Ως μικροσωματίδια ορίζεται ένα μείγμα στερεών σωματιδίων και υγρών σταγονιδίων που βρίσκονται στον αέρα. Το μείγμα αυτό αποτελείται από σωματίδια, όπως σκόνη, βρωμιά και αιθάλη, τα οποία είναι ορατά με γυμνό μάτι, αλλά και από σωματίδια τα οποία γίνονται αντιληπτά μόνο με την χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου.

Τα μικροσωματίδια προέρχονται είτε από φυσικές πηγές, όπως το θαλασινό αλάτι, η αιωρούμενη σκόνη, η γύρη και η ηφαιστειακή τέφρα (EEA, 2012c), είτε από ανθρωπογενείς πηγές, όπως η καύση ορυκτών καυσίμων για την λειτουργία οχημάτων, η οικιακή θέρμανση, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και διάφορες βιομηχανικές δραστηριότητες.

Η συνήθης κατηγοριοποίηση των PM γίνεται με βάση το μέγεθος τους και διακρίνονται στα PM<sub>2.5</sub> και PM<sub>10</sub>, όπου τα πρώτα έχουν διάμετρο μικρότερη από 2.5



μm, ενώ τα δεύτερα μικρότερη από 10 μm. Το μέγεθός τους αποτελεί το σημαντικότερο χαρακτηριστικό τους, καθώς τα μικροσωματίδια διαμέτρου μικρότερης των 10 μm μπορούν να εισέλθουν στους οργανισμούς κατά την διαδικασία της αναπνοής, μέσω την αναπνευστικής οδού, προσβάλλοντας το αίμα και τους πνεύμονες (Panagiotopoulou, 2016).

Σύμφωνα με μελέτες, η συνεχής έκθεση και εισπνοή μικροσωματιδίων μπορεί να οδηγήσει σε πνευμονικές και καρδιαγγειακές παθήσεις, αρρυθμίες και εμφράγματα, μπορεί να επηρεάσει το κεντρικό νευρικό και το αναπαραγωγικό σύστημα και να προκαλέσει καρκίνο, οδηγώντας σε πρόωρο θάνατο. Τέλος, μπορεί να επηρεάσει την ανάπτυξη της βλάστησης και άλλες διαδικασίες του οικοσυστήματος (EEA, 2014).

### **Οξειδία του αζώτου (NO<sub>x</sub>)**

Ο γενικός όρος οξειδία του αζώτου (NO<sub>x</sub>) περιγράφει τις χημικές ενώσεις που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα και περιέχουν ένα άτομο αζώτου και ένα ή περισσότερα άτομα οξυγόνου και αποτελούν ένα από τους σημαντικότερους παράγοντες ρύπανσής της. Τα κύρια από αυτά είναι το μονοξείδιο του αζώτου (NO) και το διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>). Τα περισσότερα NO<sub>x</sub> εκπέμπονται ως NO, το οποίο οξειδώνεται άμεσα στην ατμόσφαιρα δημιουργώντας NO<sub>2</sub> και έπειτα νιτρικό οξύ και άλλα νιτρικά άλατα (Chatzinikolaou et al., 2015).

Το μεγαλύτερο ποσοστό των NO<sub>x</sub> προέρχεται από ανθρωπογενείς πηγές που σχετίζονται κυρίως με την καύση ορυκτών καυσίμων σε ηλεκτρικές συσκευές, σε βιομηχανικές διεργασίες σε υψηλές θερμοκρασίες και σε λειτουργίες μηχανοκίνητων οχημάτων. Ωστόσο, υπάρχουν και φυσικές διαδικασίες, όπως η βιολογική αποσύνθεση, που συμβάλλουν στην εκπομπή οξειδίων του αζώτου (EPA, 2008).

Τα οξειδία του αζώτου συμβάλλουν στην οξίνιση και τον ευτροφισμό των υδάτων και των εδαφών και μπορεί να οδηγήσουν στο σχηματισμό μικροσωματιδίων και όζοντος, ενός από τα πιο σημαντικά από τα αέρια του θερμοκηπίου. Το διοξείδιο του αζώτου θεωρείται ότι έχει δυσμενείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, καθώς σε υψηλές συγκεντρώσεις προκαλεί φλεγμονές στο αναπνευστικό σύστημα και μειωμένη πνευμονική λειτουργία (EEA, 2014).

### **Οξειδία του θείου (SO<sub>x</sub>)**

Ο γενικός όρος οξειδία του θείου (SO<sub>x</sub>) περιγράφει τις χημικές ενώσεις που αποτελούνται μόνο από άτομα θείου και άτομα οξυγόνου, όπως τα υποξείδια του θείου (S<sub>7</sub>O<sub>2</sub>, S<sub>6</sub>O<sub>2</sub>), το μονοξείδιο του θείου (SO), το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>), το τριοξείδιο του θείου (SO<sub>3</sub>) και τα υπεροξείδια του θείου (SO<sub>3+x</sub>).

Τα οξείδια του θείου εκπέμπονται κυρίως από την καύση καυσίμων που περιέχουν χημικές ενώσεις θείου για οικιακή θέρμανση, για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και για λειτουργία οχημάτων, ενώ η ηφαιστειακή δραστηριότητα αποτελεί τη βασική φυσική πηγή SO<sub>x</sub> (EEA, 2014). Όσον αφορά τις ναυτιλιακές δραστηριότητες, γενικά τα πλοία για τη λειτουργία τους χρησιμοποιούν καύσιμα χαμηλής ποιότητας, όπως τα HFO και MDO, τα οποία περιέχουν μεγάλη ποσότητα θείου. Όμως, η υιοθέτηση αυστηρότερων κανονισμών από τον IMO (MARPOL Annex VI) έχει οδηγήσει στη χρήση καυσίμων καλύτερης ποιότητας.

Οι έρευνες έχουν δείξει ότι τα οξείδια του θείου έχουν επιπτώσεις στο αναπνευστικό σύστημα και στην πνευμονική λειτουργία, προκαλώντας βήχα, επιδείνωση του άσθματος και της χρόνιας βρογχίτιδας, ενώ η παρουσία τους στην ατμόσφαιρα μπορεί να προκαλέσει ερεθισμούς στα μάτια (EEA, 2014). Η θνησιμότητα και οι εισαγωγές στα νοσοκομεία εξαιτίας καρδιακών νόσων αυξάνονται, όταν είναι αυξημένα τα επίπεδα SO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα (WHO, 2008).

Το SO<sub>2</sub> αντιδρά με την υγρασία δημιουργώντας όξινες ενώσεις (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), οι οποίες οξύνουν το νερό και οδηγούν στο φαινόμενο της όξινης βροχής (Hunter et al., 2011). Γίνεται κατανοητό ότι τα φαινόμενα αυτά προκαλεί επιπτώσεις στο υδάτινο οικοσύστημα, καταστροφές στα δάση και οξίνιση των εδαφών.

### **Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)**

Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), σε συνηθισμένες συνθήκες περιβάλλοντος (θερμοκρασία 25° C και πίεση 1 atm), είναι άχρωμο, άοσμο και άγευστο αέριο, το οποίο είναι τοξικό για τους ανθρώπους και τα αιμογλοβικά ζώα, ακόμα και σε μικρές συγκεντρώσεις (κάτω από τα 35 ppm), παρ' όλο που παράγεται σε μικρές ποσότητες από τον ζωικό μεταβολισμό και συμμετέχει σε κάποιες βιολογικές λειτουργίες του οργανισμού.

Οι ανθρωπογενείς εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα οφείλονται κυρίως στην ατελή καύση ορυκτών καυσίμων και βιοκαυσίμων (EEA, 2014), ενώ άλλες πηγές είναι οι βιομηχανικές διεργασίες, όπως η μεταλλουργία σιδήρου.

Το μονοξείδιο του άνθρακα εισέρχεται κατά τη διαδικασία της αναπνοής και μεταφέρεται εύκολα από τους πνεύμονες στο αίμα. Η παρουσία του στο αίμα μειώνει την πρόσληψη οξυγόνου, μειώνοντας τη διαθεσιμότητα του οξυγόνου στους ιστούς του σώματος και οδηγώντας σε υποξία των ιστών (Raub et al., 1999).

### **Μη μεθανικές πτητικές οργανικές ενώσεις (NMVOC)**

Οι μη μεθανικές πτητικές οργανικές ενώσεις (Non-methane volatile organic compounds, NMVOC) είναι μια ομάδα χημικών ουσιών που περιέχουν τον άνθρακα στη μοριακή τους δομή. Γενικά, περιλαμβάνουν τις ακόλουθες χημικές ομάδες:

αλκοόλες, αλδεΐδες, αλκάνια, αρωματικά και κετόνες, καθώς και αλογονωμένα παράγωγα αυτών των ουσιών.

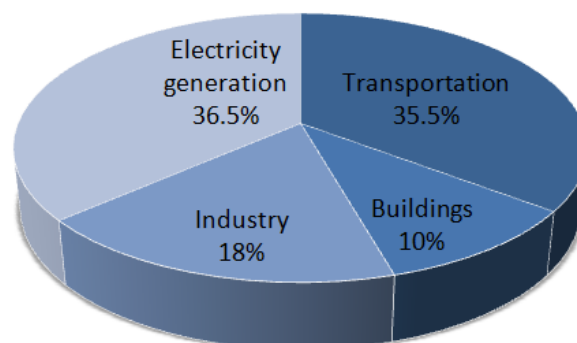
Τα NMVOC απελευθερώνονται από την καύση ορυκτών καυσίμων, ενώ συχνά περιέχονται σε διαλύτες, για παράδειγμα σε χρώματα και σπρέι αερολύματος. Επίσης, δέντρα και φυτά παράγουν φυσικά NMVOC (Swedish environmental protection agency, 2016).

Τα NMVOC θεωρούνται ότι προκαλούν διάφορες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, καθώς συνεισφέρουν στην αύξηση της συγκέντρωσης όζοντος στην τροπόσφαιρα και των δευτερογενών οργανικών αερολυμάτων, τα οποία οδηγούν σε αναπνευστικές και καρδιαγγειακές παθήσεις. Τέλος, πέρα από τις έμμεσες συνέπειες, κάποια από τα NMVOC, όπως το βενζόλιο και η φορμαλδεΐδη θεωρούνται τοξικές ουσίες με καρκινογόνα και μεταλλαξιογόνα αποτελέσματα και μπορεί να οδηγήσουν σε οξείες και χρόνιες ασθένειες (Laurent and Hauschild, 2013).

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

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) είναι το σημαντικότερο αέριο του θερμοκηπίου και οδηγεί σε κλιματικές αλλαγές (EEA, 2014) και στην υπερθέρμανση του πλανήτη.

Σύμφωνα με έρευνες (U.S. Department of Energy, 2017), για το έτος 2015 η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποτέλεσε την σημαντικότερη πηγή εκπομπής CO<sub>2</sub> με ποσοστό 36.5%, ενώ ο τομέας των μεταφορών ήταν η επόμενη σημαντικότερη πηγή με ποσοστό 35.5%, όπου η χρήση ορυκτών καυσίμων ευθύνεται για το 99.8% των εκπομπών CO<sub>2</sub> από τον συγκεκριμένο τομέα. Τέλος, μικρή συνεισφορά είχαν οι βιομηχανικές δραστηριότητες και η καύση ορυκτών καυσίμων για οικιακή χρήση με ποσοστά 18% και 10% αντίστοιχα. Στο Διάγραμμα 5 παρουσιάζονται οι σημαντικότερες πηγές εκπομπής CO<sub>2</sub> για το 2015.



**Διάγραμμα 5: Οι σημαντικότεροι πηγές εκπομπής CO<sub>2</sub> το 2015 (U.S. Department of Energy, 2017)**

### **Υποξείδιο του αζώτου (N<sub>2</sub>O)**

Το υποξείδιο του αζώτου (N<sub>2</sub>O) ανήκει στα οξείδια του αζώτου, όμως θεωρείται κύριο αέριο του θερμοκηπίου και για τον λόγο αυτό στην παρούσα εργασία εξετάζεται ξεχωριστά.

Το υποξείδιο του αζώτου παράγεται κυρίως κατά τη διάρκεια γεωργικών δραστηριοτήτων, αλλά εκπέμπεται και από βιομηχανικές δραστηριότητες, καθώς και κατά την καύση ορυκτών καυσίμων και στερεών αποβλήτων.

Ως ένα από τα βασικά αέρια του θερμοκηπίου ο κύριος αντίκτυπος του N<sub>2</sub>O είναι η υπερθέρμανση του πλανήτη. Αν και οι συνολικές εκπομπές του στο περιβάλλον είναι μικρότερες σε σχέση με τα άλλα GHG, το GWP του είναι 298 φορές μεγαλύτερο του διοξειδίου του άνθρακα (IPCC, 2007).

### **Μεθάνιο (CH<sub>4</sub>)**

Το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) είναι η απλούστερη οργανική ένωση και ειδικότερα το απλούστερο αλκάνιο- δηλαδή άκυκλος κορεσμένος υδρογονάνθρακας- αποτελώντας ένα από τα κύρια αέρια του θερμοκηπίου.

Το μεθάνιο εκπέμπεται κατά την παραγωγή και μεταφορά άνθρακα, φυσικού αερίου και πετρελαίου. Επιπλέον, σύμφωνα με έρευνες (Δασκαλάκης, 2015), μεγάλες ποσότητες CH<sub>4</sub> εκπέμπονται και κατά την καύση LNG, λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς του σε μεθάνιο.

Η υπερβολική έκθεση στο μεθάνιο μπορεί να επηρεάσει τον εγκέφαλο και τελικά να οδηγήσει σε ασφυξία, ενώ η κύρια περιβαλλοντική ανησυχία για το μεθάνιο είναι ο ρόλος που διαδραματίζει ως αέριο του θερμοκηπίου που επηρεάζει την κλιματική αλλαγή (Swedish environmental protection agency, 2016). Το GWP του μεθανίου είναι 25 φορές μεγαλύτερο από του διοξειδίου του άνθρακα (IPCC, 2007).

## **3.2 Υπολογισμός των αέριων εκπομπών**

Τις περασμένες δεκαετίες έχουν εκπονηθεί πολλές έρευνες για τον υπολογισμό των αέριων εκπομπών κατά τη λειτουργία ενός πλοίου, χρησιμοποιώντας διαφορετικές προσεγγίσεις (Whall et al., 2002; Miola et al., 2009; Tzannatos, 2010). Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι κύριες μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί:

- Πλήρης προσέγγιση εκ των άνω προς τα κάτω (Full top-down approach)

Στην προσέγγιση αυτή οι συνολικές εκπομπές του πλοίου υπολογίζονται χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά του πλοίου. Η προσέγγιση αυτή

εφαρμόστηκε στην έρευνα του Skjølsvik et al. (2000) και του Endresen et al., (2007), χρησιμοποιώντας διεθνείς στατιστικές για την χρήση καυσίμων από τα πλοία που αναφέρονταν από την Υπηρεσία Διαχείρισης Ενεργειακών Πληροφοριών (Energy Information Administration, *EIA*). Για τον υπολογισμό των παγκόσμιων εκπομπών, ο οποίος βασίστηκε στη συνολική κατανάλωση καυσίμων, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί συντελεστές εκπομπών ανάλογα με το είδος καυσίμου και τον τύπο της μηχανής.

- Προσέγγιση εκ των κάτω προς τα άνω (Bottom-up approach)

Στην προσέγγιση αυτή η κατανάλωση καυσίμου, επομένως και οι εκπομπές, υπολογίζονται ανάλογα με τον τύπο του πλοίου, χρησιμοποιώντας τη μέση ισχύ των μηχανών για κάθε τύπο πλοίου και κάνοντας παραδοχές για τη μέση φόρτιση της μηχανής και τον μέσο χρόνο λειτουργίας (Miola and Ciuffo, 2011). Η προσέγγιση αυτή εφαρμόστηκε σε πολλές μελέτες (Corbett and Koehler, 2003; Eyring et al., 2005), οι οποίες όμως παρουσίασαν σημαντικές αποκλίσεις στα αποτελέσματά τους για την παγκόσμια κατανάλωση καυσίμου σε σχέση με τις στατιστικές που αφορούσαν τα καύσιμα. Παράλληλα, ο IMO (2009) πρότεινε μια βελτιωμένη μεθοδολογία, όπου υπολογίζονται οι δραστηριότητες των πλοίων λαμβάνοντας υπόψη στοιχεία για την κίνησή τους από δορυφορικές βάσεις δεδομένων.

- Προσέγγιση εκ των άνω προς τα κάτω (Top-down approach)

Η προσέγγιση αυτή προτάθηκε από τον Wang et al. (2008) στην οποία η γη διαιρείται σε κελιά  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ . Σε κάθε κελί καθορίζεται η ένταση της κυκλοφορίας των πλοίων μέσα από βάσεις δεδομένων, όπου τελικά οι εκπομπές υπολογίζονται απευθείας ως εκπεμπόμενες από τα κελιά, κάνοντας υποθέσεις για τον τύπο των πλοίων που ταξιδεύουν σε κάθε ένα από αυτά (Miola and Ciuffo, 2011).

- Πλήρης προσέγγιση εκ των κάτω προς τα πάνω (Full bottom-up approach)

Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιήθηκε σε διάφορες μελέτες με διαφορετικούς τύπους ανάλυσης. Στην μελέτη του Entec (2005) ο υπολογισμός των αερίων εκπομπών γίνεται για κάθε πλοίο ανά διαδρομή και βασίζεται σε βάσεις δεδομένων που αφορούν τις κινήσεις του πλοίου. Ένας διαφορετικός τύπος ανάλυσης της συγκεκριμένης προσέγγισης εφαρμόστηκε από τους Georgakaki et al. (2005). Στην μελέτη αυτή αναλύθηκε ένα δίκτυο καναλιών το οποίο αποτελείται από πραγματικές διαδρομές που χρησιμοποιούνται από τα πλοία. Σε κάθε σύνδεσμο του δικτύου αυτού αξιολογείται η κυκλοφορία για τους

διάφορους τύπους πλοίων, χρησιμοποιώντας πληροφορίες σχετικά με τις εμπορικές δραστηριότητες για την εκτίμηση της κίνησης που διενεργείται μεταξύ των διαφόρων λιμένων. Τέλος, ο υπολογισμός της κατανάλωσης καυσίμου και των αερίων εκπομπών γίνεται βασιζόμενος σε παραδοχές σχετικά με τον μέσο χρόνο ταξιδιού για τον κάθε σύνδεσμο του δικτύου.

## 4. Ανάλυση κόστους Bulk Carrier

### 4.1 Η κατάσταση της αγοράς

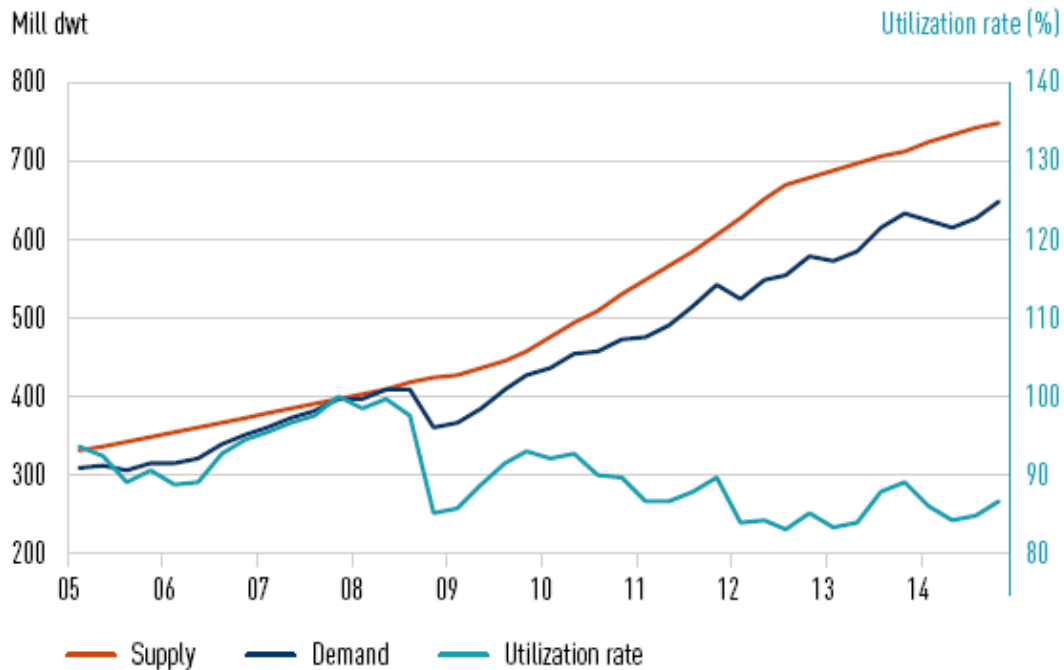
Η ναυτιλία αποτελεί αναμφίβολα μία από τις μεγαλύτερες βιομηχανίες παγκοσμίως (Storford, 1997), παίζοντας ταυτόχρονα σημαντικό ρόλο στην παγκόσμια οικονομία (Corbett and Winbrake, 2008). Όπως είναι κατανοητό, τα πλοία Bulk Carrier καλύπτουν ένα μεγάλο ποσοστό της τεράστιας ανάγκης μεταφοράς αγαθών, την οποία επιφέρει η παγκοσμιοποίηση, έχοντας τη δυνατότητα να μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες ακατέργαστων υλών, όπως σιτηρά, κάρβουνο και σιδηρομεταλλεύματα (Storford, 1997).

Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα η ζήτηση και η προσφορά της αγοράς, η ναύλωση, καθώς και οι παραγγελίες για νέα πλοία ξηρού φορτίου χύδην να είναι άμεσα εξαρτώμενη από την κατάσταση της παγκόσμιας οικονομίας. Τα μεγέθη αυτά παρουσιάζουν ελαφριά ανάκαμψη μετά την παγκόσμια οικονομική κρίση του 2008 (The Platou Report, 2015). Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει την αύξηση στο στόλο των Bulk Carriers.

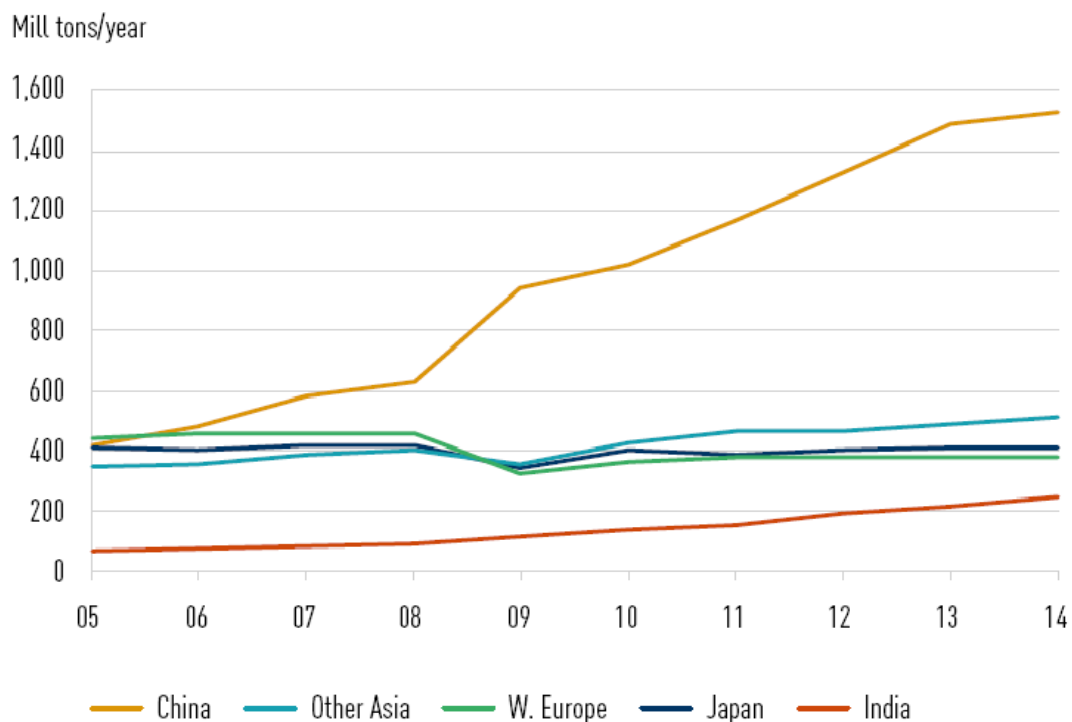
	HANDYSIZE	HANDYMAX/ SUPRAMAX	PANAMAX/ KAMSARMAX	POST PANAMAX	CAPE SIZE	TOTAL
<b>2005</b>	70.0	71.7	70.7	4.8	101.8	318.7
<b>2006</b>	71.2	76.9	76.9	5.5	110.6	340.7
<b>2007</b>	71.9	81.4	83.6	7.0	120.3	363.7
<b>2008</b>	73.8	86.5	88.5	8.8	130.8	387.8
<b>2009</b>	75.1	92.5	93.4	10.5	143.7	414.7
<b>2010</b>	74.7	100.9	97.4	14.2	169.5	456.2
<b>2011</b>	80.2	118.4	105.3	22.4	208.0	533.8
<b>2012</b>	84.2	135.1	117.3	34.6	242.7	613.4
<b>2013</b>	87.2	146.3	133.8	44.2	268.6	679.6
<b>2014</b>	86.6	153.9	146.6	48.3	281.0	716.0
<b>2015</b>	87.8	160.8	154.1	50.4	295.0	748.2

Πίνακας 4: Μέγεθος στόλου Bulk Carrier σε εκατομμύρια τόνους DWT (The Platou Report, 2015)

Όπως παρατηρείται, το μέγεθος του στόλου των Bulk Carrier ακολουθεί ανοδική πορεία, έχοντας σχεδόν διπλασιαστεί από το 2007. Στο Διάγραμμα 6 παρουσιάζεται η προσφορά, η ζήτηση και η χρήση Bulk Carrier, ενώ στο Διάγραμμα 7 παρουσιάζονται οι εισαγωγές ξηρού φορτίου ανά περιοχή.



Διάγραμμα 6: Προσφορά, ζήτηση και χρήση (The Platou Report, 2015)



Διάγραμμα 7: Εισαγωγές ξηρού φορτίου ανά χώρα/περιοχή (The Platou Report, 2015)

Από το Διάγραμμα 7 προκύπτει ότι η Κίνα έχει διαδραματίσει καταλυτικό ρόλο στην αύξηση της ζήτησης των τελευταίων δέκα ετών. Παρόλα αυτά, η τιμή των εισαγωγών στην Κίνα φαίνεται να παρουσιάζει σταθεροποίηση. Το 2013-2014, οι συνολικές εισαγωγές ξηρού φορτίου χύδην αυξήθηκαν μόλις κατά 2%. Αναλυτικά, η



εισαγωγή σιδηρομεταλλεύματος και σιτηρών αυξήθηκε κατά 13% και 52% αντίστοιχα, ενώ η εισαγωγή κάρβουνου μειώθηκε κατά 11%, του βωξίτη κατά 49% και του νικελίου κατά 33% (The Platou Report, 2015).

## 4.2 Κατηγοριοποίηση κόστους Bulk Carrier

Κάθε πλοιοκτήτρια εταιρία προσπαθεί να εξυπηρετήσει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος της αγοράς, στοχεύοντας στην αύξηση των εσόδων της. Τα έσοδα ενός πλοίου (ή στόλου πλοίων) είναι άμεσα συνδεδεμένα με τα έξοδά του, τα οποία χωρίζονται σε κάποιες υποκατηγορίες, όπως φαίνεται στον Πίνακας 5.

Type	Bareboat	Time charter	Voyage charter
<b>Master</b>	Appointed and directed by a charter	Appointed by the owner, directed by a charter	Appointed and directed by the owner
<b>Revenue</b>	Depends on hire rate and duration	Depends on hire rate, duration and off-hire time	Depends on the quantity of cargo and rate per unit of cargo
<b>Costs (paid by the owner)</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Capital costs Capital Brokerage</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Capital costs Capital Brokerage</li> <li>Operating costs Wages Provisions Maintenance Repairs Sores &amp; supplies Lube oil Water Insurance Overheads</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Capital costs Capital Brokerage</li> <li>Operating costs Wages Provisions Maintenance Repairs Sores &amp; supplies Lube oil Water Insurance Overheads</li> <li>Voyage costs <ul style="list-style-type: none"> <li>Port costs <ul style="list-style-type: none"> <li>Port charges</li> <li>Stevadorring charges</li> <li>Cleaning holds</li> <li>Cargo claims</li> </ul> </li> <li>Bunkers, etc <ul style="list-style-type: none"> <li>Canal transit dues</li> <li>Bunker fuel</li> </ul> </li> </ul> </li> </ol>

Πίνακας 5: Καταμερισμός κόστους των Bulk Carrier (Stopford, 2009)

Στον Πίνακα 5 παρατηρείται ότι τα συσχετιζόμενα με το πλοίο κόστη μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες: κόστος λειτουργίας, κόστος ταξιδιού και κόστος

κεφαλαίου. Στα παραπάνω προστίθεται και το κόστος της περιοδικής συντήρησης, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6 που ακολουθεί.

GENERAL COST CLASSIFICATION		INDIVIDUAL COST ITEMS	
Operating costs	\$2.1m p.a. 14%	Manning costs	31%
		Stores & Consumables	11%
		Repairs & Maintenance	15%
		Insurance	32%
		General costs	11%
Periodic maintenance	\$0.3 m p.a. 4%		
Voyage costs	\$6.0m p.a. 40%	Fuel oil	47%
		Port & light dues, Tugs & pilotage, Canal dues	53%
Capital costs	\$6.4m p.a. 42%	Interest/dividend	
		Debt repayment	

**Πίνακας 6:** Ανάλυση κόστους για πλοίο Capesize Bulk Carrier δέκα ετών με τιμές 2005 (Stopford, 2009)

#### 4.2.1 Κόστος λειτουργίας

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 7, το κόστος λειτουργίας αφορά στις δαπάνες που συνδέονται με την λειτουργία του πλοίου ανεξαρτήτως των ταξιδιών που εκτελεί. Αποτελείται από το κόστος του πληρώματος, των προμηθειών, της συντήρησης και της επισκευής, της ασφάλισης και της διαχείρισης (γενικό κόστος).

Ο Πίνακας 7 παρουσιάζει πώς διαμορφώνονται τα λειτουργικά έξοδα πλοίων Capesize bulk carrier ανά έτος, συναρτήσει της ηλικίας.

Age of ship	5 Years	10 Years	20 Years	% Total Average
<b>Crew cost</b>				
Crew wages	544000	639000	688000	30%
Travel, insurance etc	73000	82000	85000	4%
Victualling	46000	54000	64000	3%
<b>Total</b>	<b>743000</b>	<b>871000</b>	<b>956000</b>	<b>41%</b>
%	32%	31%	26%	
<b>Stores &amp; Consumables</b>				
General stores	129000	144000	129000	6%
Lubricants	148000	148000	219000	8%
<b>Total</b>	<b>277000</b>	<b>292000</b>	<b>348000</b>	<b>15%</b>
%	12%	11%	9%	
<b>Maintenance &amp; Repairs</b>				
Maintenance	90000	169000	10000	4%
Spares	74000	169000	181000	7%
<b>Total</b>	<b>164000</b>	<b>338000</b>	<b>393000</b>	<b>14%</b>
%	9%	15%	13%	
<b>Insurance</b>				
Hull & machinery & war risks	133000	148000	303000	9%
P&I	63000	94000	120000	4%
<b>Total</b>	<b>196000</b>	<b>243000</b>	<b>423000</b>	<b>14%</b>
%	32%	32%	44%	
<b>General costs</b>				
Registration costs	17000	17000	17000	1%
Management fees	255000	223000	255000	12%
Sundries	57000	57000	57000	3%
<b>Total</b>	<b>330000</b>	<b>298000</b>	<b>330000</b>	<b>15%</b>
%	14%	11%	9%	
<b>Total per annum</b>	<b>1710000</b>	<b>2041000</b>	<b>2450000</b>	<b>100%</b>
<b>Daily costs (365 days)</b>	<b>4685</b>	<b>5591</b>	<b>6712</b>	<b>100%</b>

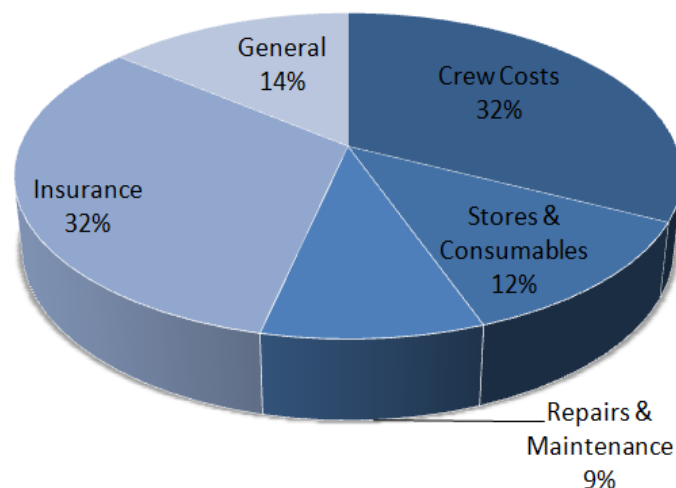
Πίνακας 7: Κόστος λειτουργίας Capesize bulk carriers (Stopford, 2009)

Παρατηρείται ότι για τα νέα πλοία (ηλικίας 5 ετών) το μεγαλύτερο ποσοστό των δαπανών κατέχουν αυτές που αφορούν το πλήρωμα αλλά και την ασφάλιση του πλοίου, αγγίζοντας 32% του συνολικού λειτουργικού κόστους. Ακολουθούν το γενικό κόστος και το κόστος αναλώσιμων και προμηθειών με ποσοστά 14% και 12% αντίστοιχα. Τέλος, οι μικρότερες δαπάνες αφορούν στην επισκευή και την συντήρηση, συμπεριλαμβανομένου του κόστους των ανταλλακτικών, με ποσοστό 9%.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το κόστος της συντήρησης και επισκευής μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες:

- Συνήθης συντήρηση: περιέχει την συντήρηση των κύριων και βοηθητικών μηχανών, το βάψιμο των υπερκατασκευών και την αντικατάσταση της μεταλλικής κατασκευής σε σημεία που είναι προσβάσιμα και ασφαλή όσο το πλοίο είναι εν πλω. Το κόστος συντήρησης, συνήθως, αυξάνεται όσο αυξάνεται η ηλικία του πλοίου.
- Επισκευή βλάβης: αφορά κυρίως μηχανικές αστοχίες και βλάβες που πιθανόν να υπάρχουν και δεν συνυπολογίζονται στη συνήθη συντήρηση. Αυτές οι εργασίες γίνονται στο ναυπηγείο στις φάσεις δεξαμενισμού (ενδιάμεση επιθεώρηση και επιθεώρηση ανανέωσης πιστοποιητικών), με αποτέλεσμα να προστίθενται επιπλέον δαπάνες καθώς το πλοίο χάνει εμπορικό χρόνο (Storford, 2009).

Το Διάγραμμα 8 παρουσιάζει πως διαμορφώνονται τα λειτουργικά έξοδα ενός πλοίου Capesize Bulk Carrier 5 ετών, καθώς και το ποσοστό συνεισφοράς των υποκατηγοριών του.



**Διάγραμμα 8:** Ημερήσια λειτουργικά έξοδα Capesize Bulk Carrier (5 ετών)

#### 4.2.2 Κόστος ταξιδιού

Η συγκεκριμένη υποκατηγορία του κόστους, που σχετίζεται με ένα πλοίο Bulk Carrier, αφορά στις δαπάνες που προκύπτουν για την υλοποίηση των ταξιδιών του πλοίου σε καθημερινή βάση. Απαρτίζεται κυρίως από τα κόστη που αφορούν τα καύσιμα, τα λιμενικά τέλη και γενικότερα τις χρεώσεις των λιμανιών αλλά και των καναλιών.

Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 6, η σημαντικότερη δαπάνη που σχετίζεται με το ταξίδι του πλοίου είναι αυτή των καυσίμων με ποσοστό 47%. Το μέγεθος αυτό εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η ταχύτητα του πλοίου, η ειδική κατανάλωση και επομένως το είδος και η φόρτιση της μηχανής, καθώς και η καύσιμη ύλη. Επιπροσθέτως, επηρεάζεται, όπως είναι φυσικό, και από την τιμή του καυσίμου, η οποία διαφέρει ανάλογα με την χρονική περίοδο και την γεωγραφική περιοχή.

Οι δαπάνες που αφορούν στα λιμάνια, τα οποία επισκέπτεται το πλοίο, αποτελούν τη δεύτερη μεγαλύτερη δαπάνη όντας το 46% επί του συνόλου. Οι δαπάνες αυτές επιβάλλονται στο πλοίο ή στο φορτίο για τη χρήση των εγκαταστάσεων και των υπηρεσιών που παρέχονται από το κάθε λιμάνι (Storford, 1997). Αποτελούνται κυρίως από τα λιμενικά τέλη ,για τη χρήση της αποβάθρας και των βασικών υποδομών του λιμανιού, τις χρεώσεις υπηρεσιών όπως η πλοήγηση και η ρυμούλκηση του πλοίου, καθώς και τη διαχείριση του φορτίου (φόρτωση-εκφόρτωση, αποθήκευση). Το μέγεθος αυτό διαφέρει ανάλογα με την πολιτική του κάθε λιμανιού.

Οι χρεώσεις καναλιών που επιβάλλονται αφορούν συνήθως τα πλοία που διέρχονται από την διώρυγα του Σουέζ ή το κανάλι του Παναμά.

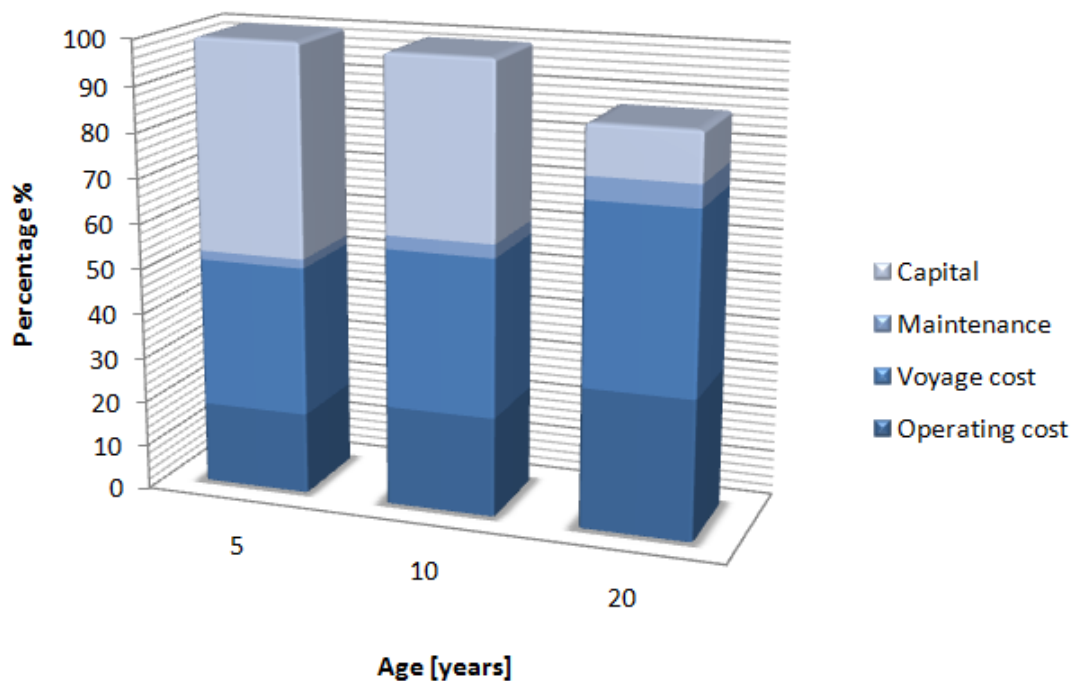
#### 4.2.3 Κόστος κεφαλαίου

Στο κόστος κεφαλαίου περιλαμβάνονται όλες οι δαπάνες του πλοιοκτήτη, ώστε να αποκτηθεί το πλοίο. Ουσιαστικά, αποτελείται από την τιμή αγοράς του πλοίου και το κόστος των δανείων του, καθώς και την υποτίμηση της αξίας του. Συχνά η περιοδική συντήρηση λαμβάνεται υπ' όψιν στο κόστος κεφαλαίου (Storford, 2009).

Η τιμή αγοράς ενός πλοίου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι η προσφορά και η ζήτηση την εκάστοτε περίοδο, το ναυπηγείο και η διαθεσιμότητά του, το μέγεθος, η κύρια και οι βοηθητικές μηχανές. Οι τιμές των πλοίων ξηρού φορτίου χύδην κυμαίνονται από 25 εκατομμύρια δολάρια για πλοία τύπου Handysize έως και πάνω από 60 εκατομμύρια δολάρια για πλοία Capesize. (Mikko Hakulinen, 2015). Είναι κατανοητό ότι οι πλοιοκτήτες συχνά χρηματοδοτούν τις εν λόγω επιχειρηματικές κινήσεις με την βοήθεια δανείων, τα κόστη των οποίων προσμετρώνται στο κόστος κεφαλαίου. Τέλος, θεωρείται ότι η αρχική τιμή του πλοίου αποσβένεται γραμμικά για τα παραγωγικά χρόνια του, συνήθως για 20 έτη και 350 ημέρες λειτουργίας (Mikko Hakulinen, 2015).

#### 4.2.4 Κόστος περιοδικής συντήρησης

Η περιοδική συντήρηση είναι η τελευταία υποκατηγορία των δαπανών του πλοίου και προκύπτει από τα έξοδα για το δεξαμενισμό του πλοίου και των ειδικών ελέγχων που διενεργούνται. Για την διατήρηση της κλάσης του, για λόγους ασφαλείας, όλα τα εμπορικά πλοία υφίστανται τακτικούς ελέγχους. Το πλοίο πρέπει να δεξαμενίζεται κάθε δύο και κάθε τέσσερα χρόνια να υπόκειται σε ειδικούς ελέγχους, ώστε να αποδεικνύει την αξιοπλοΐα του (Storford, 2009). Στο Διάγραμμα 9 παρουσιάζονται οι αλλαγές στα ποσοστά των κύριων δαπανών του πλοίου συναρτήσει της ηλικίας του, όπως αυτές προέκυψαν από την σύγκριση τριών Capesize bulk carriers.



**Διάγραμμα 9:** Ποσοστό κόστους συναρτήσει της ηλικίας του πλοίου (Storford, 2009)

Το συνολικό κόστος λειτουργίας για τα πλοία ηλικίας πέντε και δέκα ετών είναι ίδιο, ενώ για τα πλοία είκοσι χρόνων είναι περίπου 13% λιγότερο. Αυτό οφείλεται στην μεγάλη μείωση του κόστους κεφαλαίου, η οποία συμβαίνει εξαιτίας της υποτίμησης. Όμως, αγνοώντας το κόστος κεφαλαίου γίνεται αντιληπτό ότι τα νέα πλοία είναι πολύ φθηνότερα στη λειτουργία τους, με το κόστος λειτουργίας να αποτελεί το 18% έναντι 31% στα πλοία μεγαλύτερης ηλικίας και το κόστος ταξιδιού να αποτελεί το 33% έναντι 40% αντίστοιχα. Τα κόστη αυτά είναι αυξημένα σε πλοία μεγαλύτερης ηλικίας, λόγω μεγαλύτερων πληρωμάτων, τακτικότερων περιοδικών συντηρήσεων και μικρότερης απόδοσης καυσίμου (Storford, 2009). Τέλος, το κόστος ταξιδιού και συνεπώς το κόστος των καυσίμων, όπως αναλύθηκε παραπάνω, αποτελεί μεγάλο ποσοστό των δαπανών ανεξαρτήτως της ηλικίας του πλοίου.

## 5. Εξωτερικό κόστος

### 5.1 Η έννοια του εξωτερικού κόστους

Η ατμοσφαιρική μόλυνση αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες απειλές τόσο για την ανθρώπινη υγεία όσο και για το περιβάλλον (Chatzinikolaou et al., 2015). Για το λόγο αυτό, είναι σημαντική η ποσοτικοποίηση όχι μόνο των άμεσων, αλλά και των έμμεσων συνεπειών που έχουν οι ανθρώπινες δραστηριότητες, οι οποίες συνήθως έχουν επιδράσεις που δεν περιλαμβάνονται στα κίνητρα και τον σχεδιασμό τους. Οι οικονομολόγοι χρησιμοποιούν τον όρο εξωτερικό κόστος (external cost) ως το κόστος των πλευρικών επιπτώσεων μιας δραστηριότητας στην κοινωνία (Ricardo-AEA, 2014).

Το εξωτερικό κόστος σχετίζεται με την κοινωνική πρόνοια και την οικονομία. Ο υπολογισμός του για μια συγκεκριμένη δραστηριότητα αποσκοπεί στην καταμέτρηση των καταστροφών που προκαλεί στην κοινωνία και στην απόδοση των καταστροφών αυτών με νομισματικές τιμές (ExternE, 2005).

Συμπεραίνεται ότι, η εκτίμηση του εξωτερικού κόστους ενός συστήματος θεωρείται μια αποτελεσματική μέθοδος υπολογισμού και περιορισμού των πλευρικών αρνητικών επιπτώσεων της λειτουργίας του, ταυτόχρονα όμως αποτελεί μια δύσκολη και πολύπλοκη διαδικασία, καθώς απαιτεί λεπτομερείς και αξιόπιστους υπολογισμούς (Panagiotopoulou, 2016). Τέλος, το εξωτερικό κόστος χρησιμοποιείται συχνά για την επιβολή νέων κανονισμών.

### 5.2 Το εξωτερικό κόστος των ναυτιλιακών δραστηριοτήτων

Οι θαλάσσιες μεταφορές έχουν συνεισφέρει σημαντικά στην ανάπτυξη της οικονομίας και στην παγκοσμιοποίηση της αγοράς. Όμως, παράλληλα με τα πλεονεκτήματά τους έχουν διάφορες παράπλευρες επιπτώσεις στην κοινωνία, με κυριότερη την ατμοσφαιρική ρύπανση, ιδιαίτερα στις παράκτιες περιοχές.

Παρά το γεγονός ότι οι θαλάσσιες μεταφορές θεωρούνται φιλικότερες προς το περιβάλλον σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους μεταφοράς, οι έρευνες έχουν δείξει ότι οι εκπομπές αέριων ρύπων των πλοίων αποτελούν ένα σημαντικό μέρος των παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών (Tzannatos, 2009). Πιο συγκεκριμένα, εκτιμάται ότι τα ποντοπόρα πλοία εκπέμπουν ετησίως 1.2-1.6 εκατομμύρια τόνους μικροσωματιδίων (particulate matter, PM), 4.7-6.5 εκατομμύρια τόνους οξειδίων του θείου (sulfur oxides, SO<sub>x</sub>) και 5-6.9 εκατομμύρια τόνους οξειδίων του αζώτου

(nitrogen oxides, NO<sub>x</sub>), συνεισφέροντας στο 5-8% και 15% των παγκόσμιων εκπομπών SO<sub>x</sub> και NO<sub>x</sub> αντίστοιχα. Παράλληλα το 70% των εκπομπών των πλοίων εξαπλώνεται εντός της ενδοχώρας έως και 400 km διαδραματίζοντας σημαντικό ρόλο στην ατμοσφαιρική ρύπανση των παράκτιων κοινοτήτων.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, ο IMO υιοθέτησε συγκεκριμένους κανονισμούς που αφορούν στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε συγκεκριμένες περιοχές ανά τον κόσμο, γνωστές και ως Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών (Emission Control Areas, ECA), αλλά και την καταγραφή και την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Green House Gases, GHG) μέσω του Κανονισμού Παρακολούθησης-Αναφοράς- Πιστοποίησης (Monitoring- Reporting- Verifying, MRV), του δείκτη EEDI (Energy Efficiency Design Index) και του Σχεδίου SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan) που περιλαμβάνονται στο Κεφάλαιο VI της Διεθνούς Σύμβασης MARPOL, το οποίο υιοθετήθηκε από τον IMO το 1997.

Σύμφωνα με τις τελευταίες έρευνες, η εκτίμηση του εξωτερικού κόστους στον τομέα των θαλάσσιων μεταφορών αναλύεται στις παρακάτω κατηγορίες:

- **Κόστος κυκλοφοριακής συμφόρησης.**

Λαμβάνοντας υπ' όψη, τα φορτία που διακινήθηκαν, τους πλόες που πραγματοποιήθηκαν και τον χρόνο παραμονής των πλοίων σε διάφορους διεθνείς λιμένες την δεκαετία του '70, το πρόγραμμα UNITE (Nash, 2003) καταλήγει ότι δεν υπάρχει επιπλέον εξωτερικό κόστος λόγω συμφόρησης από την λειτουργία των θαλάσσιων λιμένων.

- **Κόστος ατυχημάτων.**

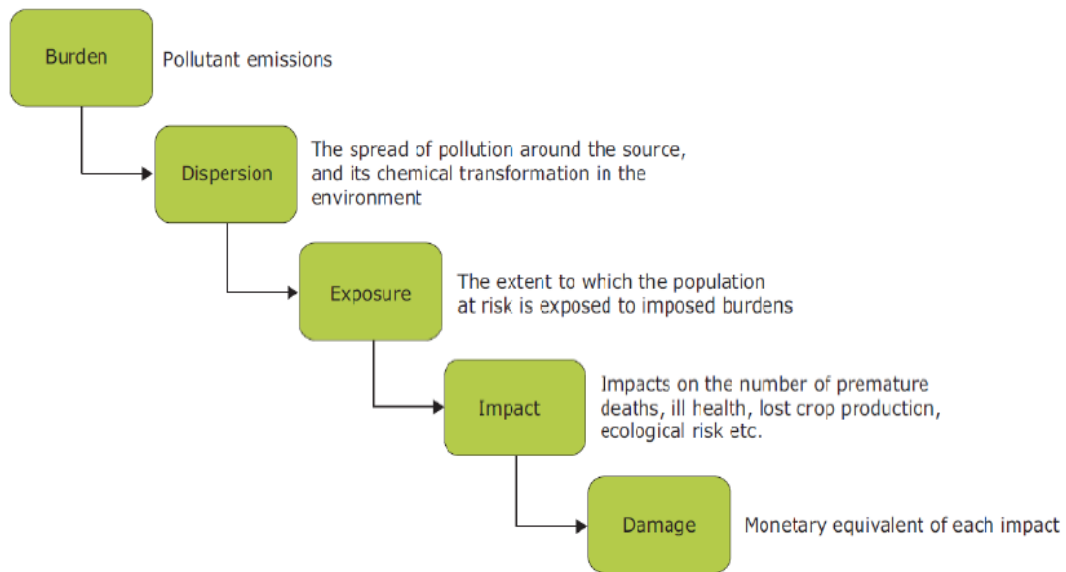
Το κόστος ατυχημάτων αφορά στα κοινωνικά κόστη που προκύπτουν από τα ατυχήματα και δεν καλύπτονται από τις ασφαλιστικές καλύψεις. Οι σημαντικότερες υποκατηγορίες είναι τα έξοδα ιατροφαρμακευτικής περίθαλψης, οι απώλειες παραγωγής, οι καταστροφές υλικών, τα έξοδα διαχείρισης, καθώς και τα κόστη πόνου, πένθους και ταλαιπωρίας εκφρασμένα σε νομισματικές μονάδες (Ricardo-AEA, 2014).

- **Κόστος ατμοσφαιρικής ρύπανσης.**

Το κόστος αυτό περιλαμβάνει τις σαφείς επιδράσεις των εκπομπών των πλοίων στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον και στις οικονομικές δραστηριότητες. Μια σειρά ερευνητικών προγραμμάτων με τίτλο ExternE, τα οποία χρηματοδοτήθηκαν από την Ε.Ε. (Ευρωπαϊκή Ένωση), υιοθέτησαν την μέθοδο IPA (Impact Pathway Approach). Η μέθοδος αυτή ακολουθεί μία λογική και σταδιακή εξέλιξη από τον καθορισμό των εκπεμπόμενων ρύπων έως τον



προσδιορισμό των επιπτώσεών τους και ακολούθως τον υπολογισμό του σχετικού κόστους με νομισματικούς όρους (EEA, 2014).



Σχήμα 4: Impact Pathway Approach (IPA) (EEA, 2014)

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται τα βασικά βήματα της μεθόδου IPA, τα οποία αναλύονται στη συνέχεια:

1. Καθορισμός των καυσαερίων εκπομπών που είναι αποτέλεσμα των θαλασσιών μεταφορών. Οι εκπομπές που προκύπτουν από τον τομέα των μεταφορών γενικά διακρίνονται στους πρωτογενείς και δευτερογενείς ρύπους. Οι πρώτοι αναφέρονται στα άμεσα παράγωγα της ατελούς καύσης, όπως είναι τα οξειδία του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ), το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ), το μονοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}$ ), πτητικές οργανικές ενώσεις ( $\text{VOC}$ ), κάποιοι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAH) και βαρέα μέταλλα. Οι δεύτεροι δημιουργούνται μέσω χημικών αντιδράσεων στην ατμόσφαιρα και αποτελούνται από το όζον ( $\text{O}_3$ ), νιτρικά και θειικά άλατα. Τέλος, υπάρχουν και τα μικροσωματίδια (PM), τα οποία περιέχουν στοιχεία τόσο πρωτογενών όσο και δευτερογενών καυσαερίων (Ricardo-AEA, 2014).
2. Υπολογισμός, συνήθως με την βοήθεια υπολογιστικών μοντέλων, της ατμοσφαιρικής διασποράς των ρύπων γύρω από την πηγή που δημιουργήθηκαν. Σε αυτά, η διασπορά εξετάζεται σε τοπική κλίμακα, στην οποία υπολογίζονται μόνο οι πρωτογενείς ρύποι και σε περιφερειακή κλίμακα, στην οποία συνυπολογίζονται και οι δευτερογενείς (Chatzinikolaou et al., 2015).
3. Εκτίμηση του μεγέθους του πληθυσμού που έχει εκτεθεί στους ατμοσφαιρικούς ρύπους.
4. Ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων που προκύπτουν και αφορούν την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον.
5. Αποτύπωση των συνεπειών σε νομισματικές μονάδες.

- **Κόστος θορύβου.**

Οι εκπομπές θορύβου αποτελούν πρόβλημα αυξανόμενης σημασίας για τον άνθρωπο. Ο θόρυβος ορίζεται ως οι ανεπιθύμητοι ήχοι ή ήχοι διάρκειας, έντασης ή ποιότητας που μπορούν να προκαλέσουν σωματικές ή ψυχολογικές βλάβες στον άνθρωπο. Οι αρνητικές επιπτώσεις από τις εκπομπές θορύβου μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες (CE Delft, 2011):

1. Κόστος ενόχλησης: Αφορά τις ανεπιθύμητες κοινωνικές διαταραχές που προκαλούνται από τον θόρυβο και οδηγούν σε κοινωνικό ή οικονομικό κόστος, όπως το αίσθημα δυσφορίας ή ταλαιπωρίας ή ο οποιοδήποτε περιορισμός ή αποκλεισμός από κάθε επιθυμητή δραστηριότητα αναψυχής.
2. Βλάβες στην υγεία: Επίπεδα θορύβου άνω των 85 dB(A) μπορούν να προκαλέσουν βλάβη στην ακοή, ενώ χαμηλότερα επίπεδα θορύβου (άνω των 60 dB(A) αυξάνουν τον κίνδυνο καρδιαγγειακών παθήσεων, πιθανόν να προκαλέσουν αντιδράσεις νευρικού στρες, όπως αύξηση της αρτηριακής πίεσης και ορμονικές αλλαγές, ενώ τέλος μπορεί να οδηγήσουν σε μείωση της ποιότητας του ύπνου. Όλες οι παραπάνω συνέπειες έχουν ως αποτέλεσμα δαπάνες, όπως το ιατρικό κόστος, το κόστος απώλειας παραγωγικότητας και το κόστος αυξημένης θνησιμότητας.

Στις θαλάσσιες μεταφορές παρατηρούνται αυξημένα επίπεδα θορύβου στις περιοχές των λιμένων, γεγονός που οφείλεται στη λειτουργία των πλοίων, στη διαχείριση του φορτίου τους (μεταφορά και φορτοεκφόρτωση), αλλά και στην αυξημένη χερσαία κίνηση που παρατηρείται στις εν λόγω περιοχές. Παρ' όλα αυτά, η νομοθεσία για τα επίπεδα θορύβου από τη λειτουργία των πλοίων στα λιμάνια παραμένει χαλαρή και περιορίζεται στους κανονισμούς του IMO [Απόφαση A.468 (XII)], σύμφωνα με την οποία τα επίπεδα θορύβου κατά την κανονική λειτουργία του πλοίου δεν πρέπει να ξεπερνούν τα 70 dB(A) (Panagiotopoulou, 2016), σε συνδυασμό με τα όρια που τίθενται από την εθνική νομοθεσία (Άρθρο 14 Ν. 1650/86).

- **Κόστος κλιματικής αλλαγής.**

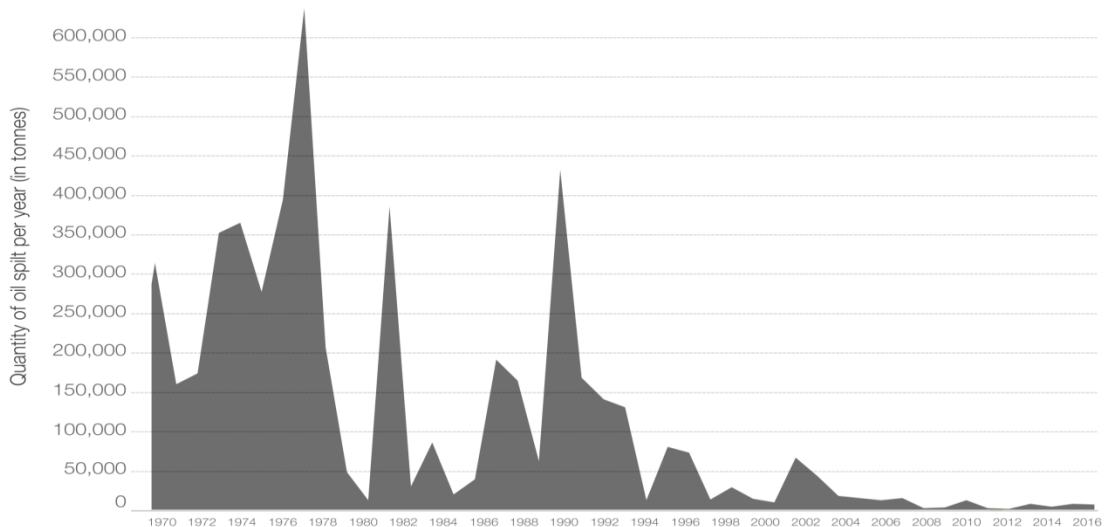
Το 2007 περίπου το 19.5% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Greenhouse Gases, GHG) προκλήθηκε από τον τομέα των μεταφορών. Οι εκπομπές αυτές επιδρούν αρνητικά στο οικοσύστημα συμβάλλοντας στην υπερθέρμανση του πλανήτη προκαλώντας την άνοδο της στάθμης της θάλασσας (εξαιτίας αλλαγών στις θερμοκρασίες και στις βροχοπτώσεις) και την αύξηση των ακραίων καιρικών φαινομένων. Επίσης, επιδρούν δυσμενώς τόσο στην ανθρώπινη υγεία, αυξάνοντας το θερμικό στρες και πολλαπλασιάζοντας τους παρασιτικούς οργανισμούς και τις ασθένειες, όσο και στη βιοποικιλότητα του περιβάλλοντος (CE Delft, 2011). Τα βασικά αέρια του θερμοκηπίου που

συνδέονται με τις θαλάσσιες μεταφορές είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), το υποξείδιο του αζώτου (N<sub>2</sub>O) και το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>).

Όπως ήδη αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, τα διάφορα GHG επιδρούν στην ατμόσφαιρα για διαφορετική διάρκεια χρόνου απορροφώντας διαφορετική ποσότητα θερμότητας. Το δυναμικό παγκόσμιας θέρμανσης (Global Warming Potential, GWP) κάθε GHG υποδεικνύει την ποσότητα απορρόφησης θερμότητας του αερίου για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο (συνήθως 100 χρόνια) (Brander, 2012). Σύμφωνα με έρευνες (IPCC, 2007), το GWP του CO<sub>2</sub> είναι ίσο με 1, συνεπώς το GWP των υπολοίπων αερίων του θερμοκηπίου ισοδυναμούν με το πόσες φορές περισσότερο συμβάλλουν στην παγκόσμια υπερθέρμανση σε σύγκριση με το CO<sub>2</sub>. Τελικά, πολλαπλασιάζοντας την ποσότητα του GHG με τον αντίστοιχο GWP είναι δυνατό να εκφραστούν όλα τα αέρια του θερμοκηπίου σε μία κοινή μονάδα γνωστή ως «ισοδύναμο του διοξειδίου του άνθρακα» (Carbon dioxide equivalent, CO<sub>2</sub>e).

- **Κόστος στο φυσικό τοπίο.**

Οι επιδράσεις της ναυτιλιακής δραστηριότητας στο φυσικό τοπίο γενικά θεωρούνται αμελητέες, όμως, σε συγκεκριμένα ατυχήματα, κυρίως σε αυτά που δημιουργούνται πετρελαιοκηλίδες, οι καταστροφές μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικές και το κόστος στο φυσικό τοπίο τεράστιο.



**Σχήμα 5:** Συνολική ποσότητα διαρρέοντος πετρελαίου την περίοδο 1967-2016  
(<https://ourworldindata.org/oil-spills>)

Όπως γίνεται αντιληπτό και από το Σχήμα 5, έχει περιοριστεί σε μεγάλο βαθμό η ποσότητα του διαρρέοντος πετρελαίου στη θάλασσα που οφείλεται στη ναυτιλιακή δραστηριότητα, ως απόρροια των αυστηρών κανονισμών που έχουν θεσπιστεί για την προστασία του περιβάλλοντος.

## 5.3 Κανονισμοί

Προκειμένου να υπάρξει δραστική μείωση των αέριων εκπομπών από τη ναυτιλιακή δραστηριότητα, τα τελευταία χρόνια μια σειρά κανονισμών έχουν υιοθετηθεί από τον οργανισμό IMO και έχουν τεθεί σε ισχύ. Οι συγκεκριμένοι κανονισμοί επικεντρώνονται στην καταγραφή και τη θέσπιση ορίων των αέριων εκπομπών κατά τη λειτουργία του πλοίου. Πιο συγκεκριμένα, οι κανονισμοί αφορούν στην παρακολούθηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και στην καταγραφή τους (MRV), τη θέσπιση ορίων στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (Δείκτης EEDI), οξειδίων του αζώτου (Tier I, II, III) καθώς και οξειδίων του θείου σε Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών (ECA).

### 5.3.1 Κανονισμός MRV

Η Ευρωπαϊκή Ένωση με τον Κανονισμό (ΕΥ) 2015/757, γνωστό και ως Κανονισμό MRV, εισήγαγε ένα σύστημα παρακολούθησης, αναφοράς και επικύρωσης των εκπομπών CO<sub>2</sub> βασιζόμενο στην κατανάλωση καυσίμου των πλοίων. Ο κανονισμός αυτός θεωρείται το πρώτο βήμα ώστε να συμπεριληφθούν οι εκπομπές ρύπων από τη ναυτιλιακή δραστηριότητα στη δέσμευση της Ευρωπαϊκής Ένωσης για μείωση των αερίων του θερμοκηπίου (Lloyd's Register). Ο κανονισμός MRV τέθηκε σε ισχύ την 1 Ιουλίου 2015, ενώ η πρώτη περίοδος παρακολούθησης των εκπομπών ξεκίνησε την 1 Ιανουαρίου 2018.

Ο MRV αφορά όλα τα πλοία, ανεξαρτήτου σημαίας, τα οποία ξεπερνούν τους 5000 *gt* και εκτελούν πλόες προς, από ή μεταξύ λιμένων της Ευρωπαϊκής Ένωσης και εκτιμάται ότι θα επηρεάσει περισσότερα από 15000 πλοία παγκοσμίως (Lloyd's Register). Αξίζει να σημειωθεί ότι εκτός από τις εκπομπές CO<sub>2</sub> απαιτείται επίσης καταγραφή και άλλων δεδομένων, όπως η κατανάλωση καυσίμου, η διανυθείσα απόσταση, ο χρόνος εν πλω, το μεταφερόμενο φορτίο και το μεταφορικό έργο τόσο ανά διαδρομή όσο και ανά έτος λειτουργίας, καθώς επίσης και η μέση ετήσια ενεργειακή απόδοση για κάθε πλοίο.

Ο Κανονισμός απαιτεί την δημοσιοποίηση των δεδομένων αυτών και την επικύρωσή τους από Ανεξάρτητες Αρχές στο τέλος κάθε έτους.

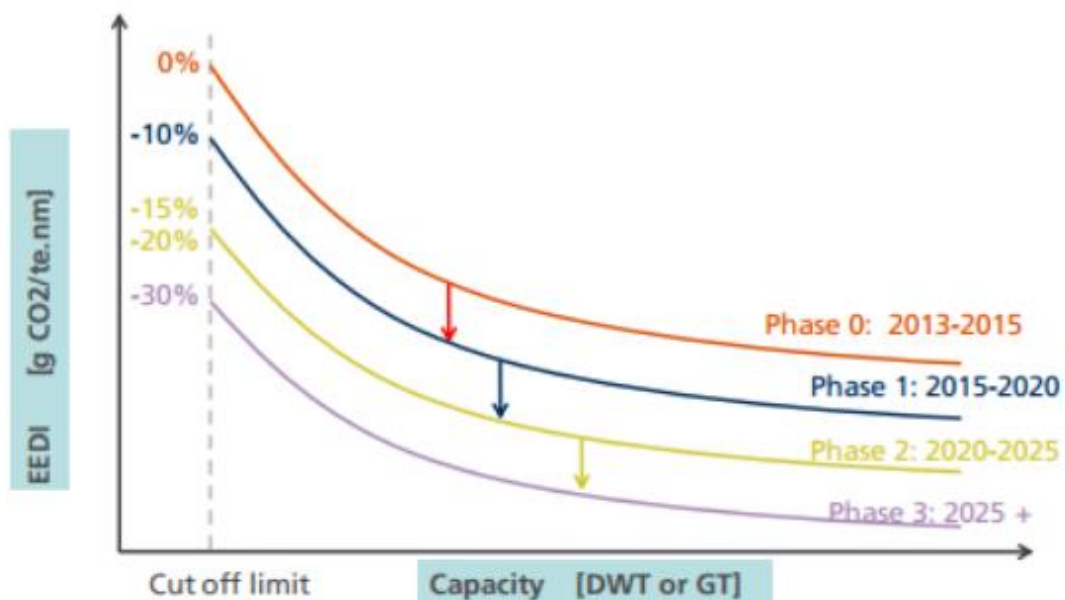
### 5.3.2 Δείκτης EEDI

Για τον αποτελεσματικότερο έλεγχο των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου αλλά και τη δημιουργία αποδοτικότερων ενεργειακά πλοίων, η Επιτροπή Προστασίας Θαλασσίου Περιβάλλοντος (*Marine Environment Protection Committee, MEPC*) του IMO ανέπτυξε το Δείκτη Σχεδίασης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (*Energy Efficiency Design Index, EEDI*).

Ο Δείκτης EEDI υποδεικνύει την ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου σε μια δεδομένη κατάσταση λειτουργίας και είναι ο λόγος μεταξύ του κόστους, εκφραζόμενου από τις εκπομπές CO<sub>2</sub>, και του κέρδους, το οποίο εκφράζεται από το μεταφορικό έργο (δηλαδή το μεταφερόμενο φορτίο επί την διανυθείσα απόσταση) (IMO, 2016). Η μονάδα μέτρησης του EEDI είναι «γραμμάρια CO<sub>2</sub> ανά τόνους χωρητικότητας \* μίλια απόστασης» και εκφράζει την παραγόμενη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα ανά μεταφορικό έργο.

$$EEDI = \frac{CO_2 \text{ emissions}}{\text{Transport work}} \quad (1)$$

Στο Διάγραμμα 10 φαίνονται τα όρια που έχει ήδη θέσει σε ισχύ ο IMO για το Δείκτη EEDI, καθώς και οι περαιτέρω μειώσεις των ορίων αυτών, οι οποίες αναμένεται να τεθούν σε ισχύ τα επόμενα χρόνια.

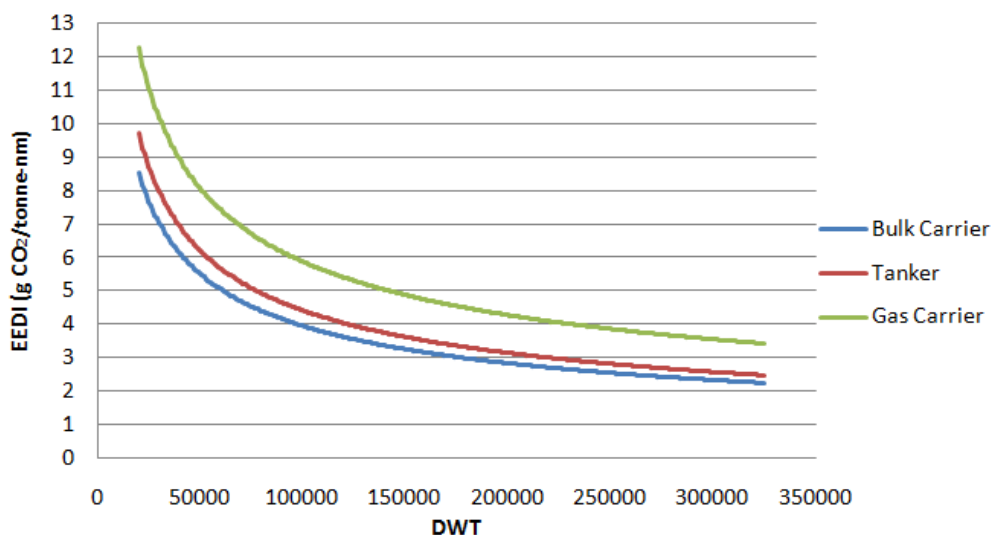


Διάγραμμα 10: Όρια EEDI ανά χωρητικότητα πλοίου (IMO, 2016)

Η γραμμή αναφοράς του Δείκτη EEDI περιγράφεται από τον παρακάτω τύπο (IMO, 2016):

$$\text{Reference EEDI} = a * b^{-c} \quad (2)$$

όπου οι παράμετροι a, b, c δίνονται από πίνακες ανάλογα με τον τύπο του πλοίου. Στο Διάγραμμα 11 αποτυπώνεται η γραμμή αναφοράς του Δείκτη EEDI ανάλογα με τον τύπο του πλοίου.



Διάγραμμα 11: Γραμμή αναφοράς δείκτη EEDI (IMO, 2016)

### 5.3.3 Περιοχές ελέγχου εκπομπών

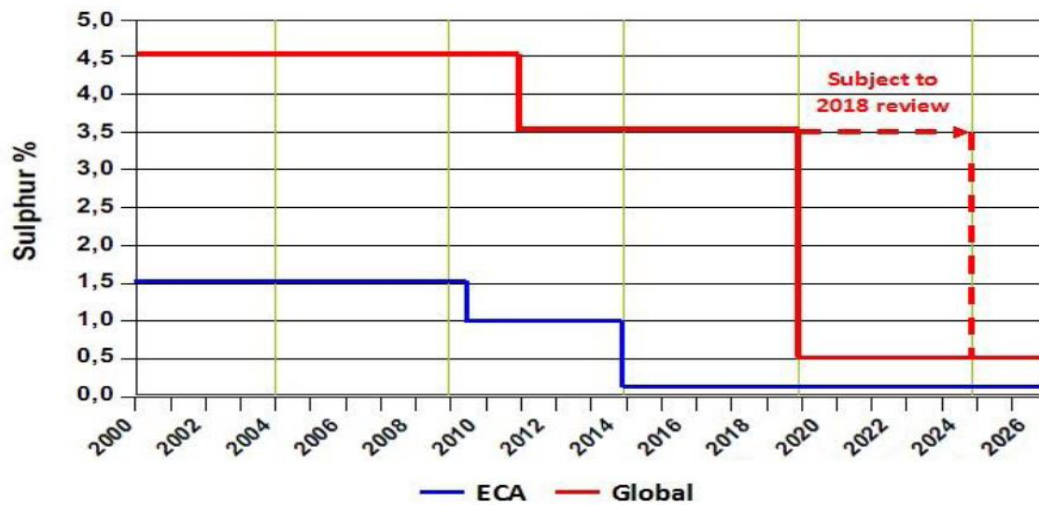
Ο IMO στοχεύοντας στην περαιτέρω μείωση των εκπομπών από τη ναυτιλιακή δραστηριότητα υιοθέτησε κανονισμούς που αφορούν τις εκπομπές οξειδίων του θείου και οξειδίων του αζώτου κατά τη λειτουργία των πλοίων. Στο παράρτημα VI της Διεθνούς Σύμβασης για την Πρόληψη της Ρύπανσης από Πλοία (*Marine Pollution, MARPOL*) περιγράφονται τα όρια των εκπομπών SO<sub>x</sub> και NO<sub>x</sub> στις Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών (*Emission Control Area, ECA*) αλλά και εν γένει σε παγκόσμιο επίπεδο (Πίνακας 8 και Πίνακας 9).

Σύμφωνα με τον IMO, Κανονισμός 14, τα όρια των SO<sub>x</sub> σε παγκόσμιο επίπεδο μειώθηκαν αρχικά σε 3.50% την 1η Ιανουαρίου 2012, από το ισχύον 4.50%, ενώ την 1η Ιανουαρίου 2020 αναμένεται να μειωθούν σε 0.50%. Όσον αφορά τις Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών Θείου (*Sulfur oxide Emission Control Areas, SECAs*), το όριο μειώθηκε αρχικά σε 1.00% την 1η Ιουλίου 2010 από το μέχρι τότε όριο του 1.50% και στην συνέχεια σε 0.10% την 1η Ιανουαρίου 2015.

Outside an ECA established to limit SO <sub>x</sub> and particulate matter emissions	Inside an ECA established to limit SO <sub>x</sub> and particulate matter emissions
4.50% m/m prior to 1 January 2012	1.50% m/m prior 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

Πίνακας 8: Όρια εκπομπών SO<sub>x</sub> (IMO, Regulation 14)

Στο Διάγραμμα 12 παρουσιάζονται τα όρια περιεκτικότητας σε θείο των καυσίμων.



Διάγραμμα 12: Όρια SO<sub>x</sub> (IMO, Regulation 14)

Σύμφωνα με τον IMO, Κανονισμός 13, περιγράφονται τρεις βαθμίδες απαιτήσεων για τα όρια των εκπομπών οξειδίων του αζώτου. Η πρώτη βαθμίδα (*Tier I*) τέθηκε σε ισχύ την 1η Ιανουαρίου 2000, είχε παγκόσμια ισχύ και προέβλεπε όριο 17 γραμμαρίων NO<sub>x</sub> ανά κιλοβατώρα για τις αργόστροφες μηχανές ( $n < 130 \text{ rpm}$ ). Η δεύτερη βαθμίδα (*Tier II*) έχει τεθεί σε ισχύ σε παγκόσμιο επίπεδο από την 1η Ιανουαρίου 2011 και περιλαμβάνει μείωση των ορίων κατά 20% σε σχέση με την πρώτη. Αυτό σημαίνει ότι για τις αργόστροφες μηχανές το όριο είχε τεθεί στα 14.4 γραμμάρια NO<sub>x</sub> ανά κιλοβατώρα. Τέλος, η τρίτη βαθμίδα (*Tier III*) τέθηκε σε ισχύ την 1η Ιανουαρίου 2016 και αφορά στις Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών Αζώτου (*Nitrous oxide Emission Control Areas, NECAs*). 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 ντιζελ (Δασκαλάκης, 2015). Τα όρια με βάση τους κανονισμούς εκφράζονται σε γραμμάρια εκπομπών ανά κιλοβατώρα και βρίσκονται σε άμεση εξάρτηση με τις στροφές λειτουργίας της μηχανής πλοίου.

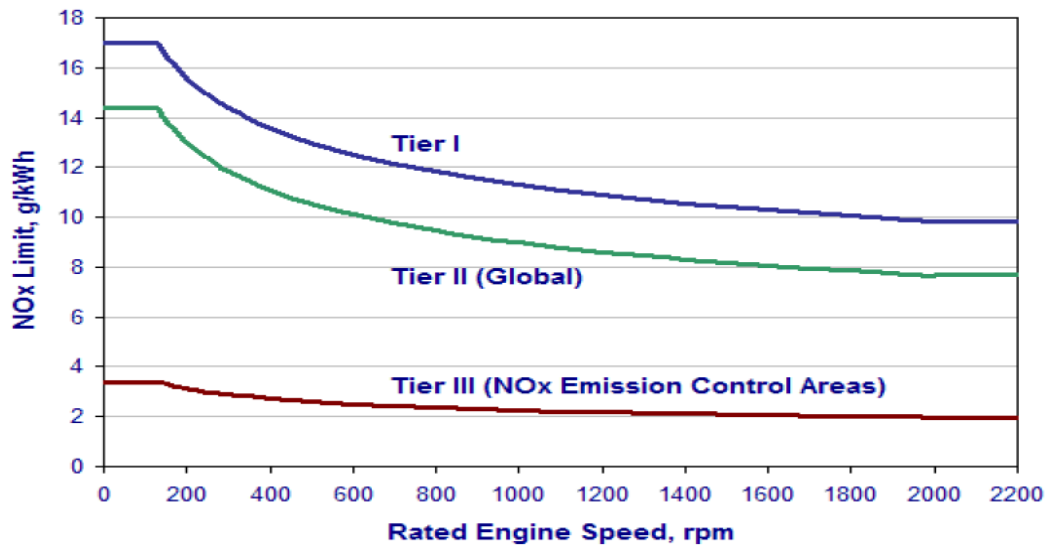
**Tier**   **Ship construction date on or after**   **Total weighted cycle emission limit (g/kWh)**

		$n = \text{engine's rated speed (rpm)}$		
		$n < 130$	$n = 130 - 1999$	$n \geq 2000$
<b>I</b>	1 January 2000	17.0	$45 \cdot n^{(-0.2)}$ e.g., 720 rpm – 12.1	9.8
<b>II</b>	1 January 2011	14.4	$44 \cdot n^{(-0.23)}$ e.g., 720 rpm – 9.7	7.7
<b>III</b>	1 January 2016	3.4	$9 \cdot n^{(-0.2)}$ e.g., 720 rpm – 2.4	2.0

Πίνακας 9: Όρια εκπομπών NO<sub>x</sub> (IMO, Regulation 13)



Στο Διάγραμμα 13 παρουσιάζονται τα όρια των εκπομπών NO<sub>x</sub> ανά κιλοβατώρα σε συνάρτηση με τις στροφές της κύριας μηχανής του πλοίου.

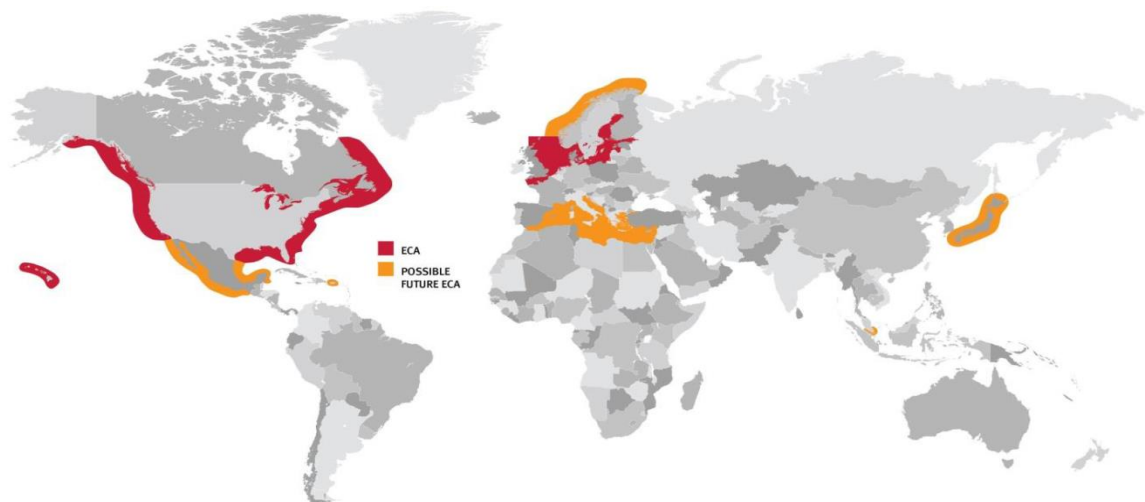


Διάγραμμα 13: Όρια εκπομπών NO<sub>x</sub> (IMO, Regulation 13)

Σύμφωνα με τον IMO οι καθιερωμένες ECA είναι:

1. Βαλτική θάλασσα - όπως ορίζεται στο Παράρτημα I της MARPOL (μόνο SO<sub>x</sub>)
2. Βόρεια θάλασσα - όπως ορίζεται στο Παράρτημα V της MARPOL (μόνο SO<sub>x</sub>)
3. Βόρεια Αμερική (τέθηκε σε ισχύ την 1η Αυγούστου 2012) - όπως ορίζεται στο Προσάρτημα VII του Παραρτήματος VI της MARPOL (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, PM) και
4. Καραϊβική θάλασσα (τέθηκε σε ισχύ την 1η Ιανουαρίου 2014) - όπως ορίζεται στο Προσάρτημα VII του Παραρτήματος VI της MARPOL (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, PM).

Στην Εικόνα 1 παρουσιάζονται οι υφιστάμενες Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών, καθώς και περιοχές που αποτελούν πιθανές μελλοντικές ECA.



Εικόνα 1: Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών (ECA) (Panagiotopoulou, 2016)



## 6. Περιγραφή υπολογιστικού μοντέλου

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός υπολογιστικού προγράμματος που θα υπολογίζει τον βέλτιστο συνδυασμό πλοίων Bulk Carrier, για την εκτέλεση ενός δρομολογίου κατά τη διάρκεια ενός έτους λειτουργίας, με βασικό γνώμονα τρία κριτήρια: τις εκπομπές αέριων ρύπων, το εξωτερικό κόστος και το κόστος λειτουργίας. Στη συνέχεια, τα σχετικά αποτελέσματα ανάγονται στον κύκλο ζωής του πλοίου με την εφαρμογή της μεθόδου Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.

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

$$t_{trip} = \sum_{j=1}^n t_j \quad (3)$$

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

$$N_{trips/year} = \frac{365 - t_{off}}{t_{trip}} \quad (4)$$

όπου  $t_{off}$  ο χρόνος, σε ημέρες σε ένα έτος, όπου το πλοίο μένει ανενεργό (λόγω επισκευών κ.λπ.)

Ο χρόνος που το πλοίο μένει ανενεργό κατά τη διάρκεια ενός έτους υπολογίζεται συναρτήσει της ηλικίας του, σύμφωνα με τον Πίνακα 10 (Panagiotopoulou, 2016):

Age	Days off
1	15.88
2	17.38
3	18.88
4	20.38
5	21.88
6	23.88
7	24.88
8	26.38
9	27.88
10	29.38
11	30.87

12	32.37
13	33.87
14	35.37
15	36.87
16	38.37
17	39.87
18	41.37
19	42.87
20	44.37
21	45.87
22	47.37
23	48.87
24	50.37
25	51.86

Πίνακας 10: Ημέρες σε ένα έτος όπου το πλοίο μένει ανενεργό συναρτήσει της ηλικίας (Panagiotopoulou, 2016)

## 6.1 Υπολογισμός αερίων εκπομπών

Ο υπολογισμός των εκπομπών αερίων ρύπων του πλοίου κατά τη λειτουργία του εστιάζει στις εκπομπές που προέρχονται από την λειτουργία των μηχανών του (κύριες και δευτερεύουσες μηχανές). Στην εργασία αυτή, ο υπολογισμός των εκπομπών από την λειτουργία των μηχανών έγινε με τη χρήση του υπολογιστικού εργαλείου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής εργασίας (Δασκαλάκης, 2015). Στη συνέχεια, ακολουθεί περιγραφή της μεθόδου που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο υπολογιστικό εργαλείο.

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

$$FC_{TOTAL} = \sum_{j=1}^n FC(t_j) = 24 \cdot 10^{-6} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [LF_{i,j} \cdot MCR_i \cdot SFC_{i,j} \cdot t_j] \quad (5)$$

όπου  $i$  η μηχανή  $i$  του πλοίου

$m$  ο αριθμός των εγκατεστημένων μηχανών

$j$  η εκάστοτε λειτουργία του πλοίου

$n$  ο συνολικός αριθμός λειτουργιών

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

$MCR_i$  η μέγιστη συνεχής ισχύς της μηχανής  $i$

$SFC_{i,j}$  η ειδική κατανάλωση καυσίμου της μηχανής  $i$  κατά τη λειτουργία  $j$

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

$$LF = \left( \frac{Actual\ Speed}{Maximum\ Speed} \right)^3 \quad (6)$$

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

Είδος ρύπου	HFO (g/g fuel)	MDO (g/g fuel)	LNG (g/g fuel)
CO <sub>2</sub>	3.114	3.206	2.750
NO <sub>x</sub>	0.07846	0.07375	0.00783
SO <sub>x</sub>	0.04908	0.00264	0.00002
PM	0.00699	0.00102	0.00018
CO	0.00277	0.00277	0.00783
CH <sub>4</sub>	0.00006	0.00006	0.05120
N <sub>2</sub> O	0.00016	0.00015	0.00011
NMVOG	0.00308	0.00308	0.00301

Πίνακας 11: Συντελεστές αέριων εκπομπών κατά τη λειτουργία του πλοίου (IMO,2014)

## 6.2 Υπολογισμός κόστους λειτουργίας

Το κόστος λειτουργίας του πλοίου υπολογίζεται βάσει της κατανάλωσης καυσίμων, η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο (5) και στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται με την τιμή ανά τόνο καυσίμου στα λιμάνια τα οποία επισκέπτεται το πλοίο και που θεωρείται ότι ανεφοδιάζεται.

Η κατανάλωση καυσίμου υπολογίζεται τόσο για τις κύριες μηχανές, ανάλογα με το καύσιμο που χρησιμοποιούν (HFO, MDO, LNG), όσο και για τις δευτερεύουσες, οι οποίες θεωρείται ότι χρησιμοποιούν μόνο MDO.

Όσον αφορά την ειδική κατανάλωση καυσίμου των βοηθητικών μηχανών λαμβάνεται από βιβλιογραφικές αναφορές ίση με 0.200 kg/kWh (Andersen, 2012).

## 6.3 Υπολογισμός εξωτερικού κόστους

Ο υπολογισμός του εξωτερικού κόστους γίνεται προσθέτοντας τα επιμέρους εξωτερικά κόστη για κάθε αέριο ρύπο (PM, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, NMVOG), τα οποία προκύπτουν πολλαπλασιάζοντας την εκπεμπόμενη ποσότητα του καυσαερίου

ρύπου με τον αντίστοιχο συντελεστή εξωτερικού κόστους, εξαρτώμενου από την θαλάσσια περιοχή λειτουργίας, όπως περιγράφεται στον παρακάτω τύπο:

$$EC_{emissions} = \sum_{i=0}^n EC_i = \sum_{i=0}^n E_i \cdot EC_{f_i} \quad (7)$$

όπου  $i$  η καυσαέρια εκπομπή  $i$   
 $n$  ο αριθμός των καυσαερίων ρύπων  
 $EC_i$  το εξωτερικό κόστος για τον καυσαέριο ρύπο  $i$   
 $E_i$  η ποσότητα του καυσαερίου ρύπου  $i$   
 $EC_{f_i}$  ο συντελεστής εξωτερικού κόστους για τον καυσαέριο ρύπο  $i$  σε συνάρτηση με τη θαλάσσια περιοχή λειτουργίας βάσει του Πίνακας 12

Θαλάσσια περιοχή	NM VOC (EUROS/tn)	NO <sub>x</sub> (EUROS/tn)	PM (EUROS/tn)	SO <sub>2</sub> (EUROS/tn)
Baltic Sea	1100	4700	13800	5250
Black Sea	500	4200	22550	7950
Mediterranean Sea	750	1850	18500	6700
North Sea	2100	5950	25800	7600
Remaining North-East Atlantic	700	2250	5550	2900

Πίνακας 12: Συντελεστές εξωτερικού κόστους συναρτήσει της θαλάσσιας περιοχής (Ricardo-AEA, 2014)

Το εξωτερικό κόστος των αερίων του θερμοκηπίου (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>) υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο, αφού πρώτα η εκπεμπόμενη ποσότητα κάθε GHG εκφραστεί στην ισοδύναμη ποσότητα CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>e):

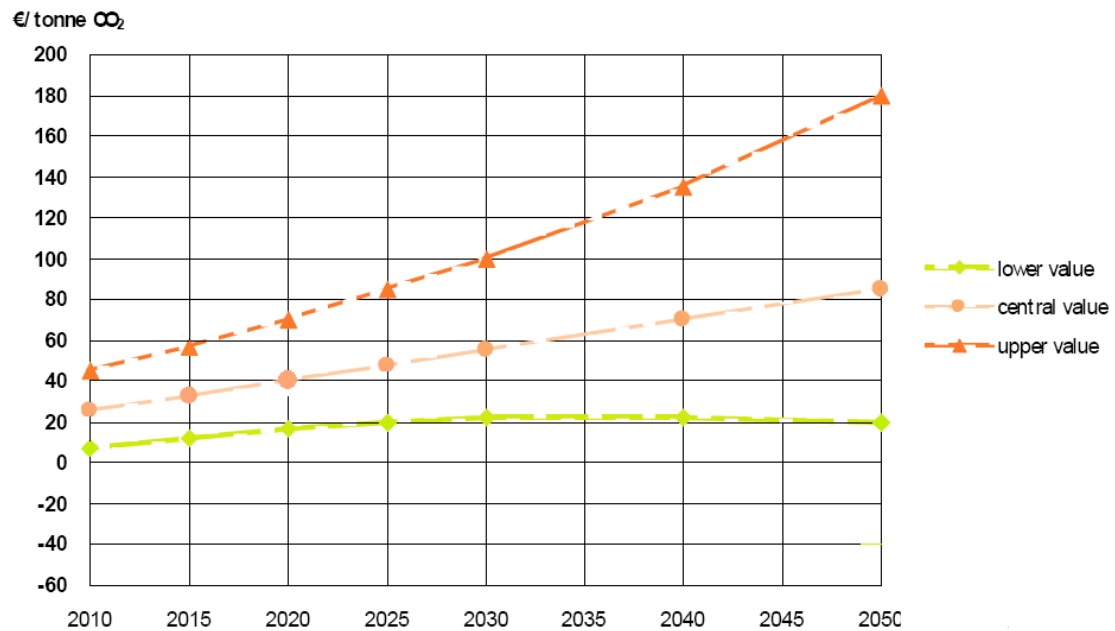
$$EC_{GHG} = E_{CO_2e} \cdot EC_{f_{CO_2e}} = \left( \sum_{i=0}^n E_i \cdot GWP_i \right) \cdot EC_{f_{CO_2e}} \quad (8)$$

όπου  $i$  το αέριο του θερμοκηπίου  $i$   
 $n$  ο αριθμός των GHG  
 $E_{CO_2e}$  η εκπεμπόμενη ποσότητα GHG σε ισοδύναμο CO<sub>2</sub>  
 $EC_{f_{CO_2e}}$  ο συντελεστής εξωτερικού κόστους για το ισοδύναμο CO<sub>2</sub>  
 $E_i$  η ποσότητα του αερίου του θερμοκηπίου  $i$   
 $GWP_i$  το δυναμικό παγκόσμιας θέρμανσης του αερίου του θερμοκηπίου  $i$ , βάσει του Πίνακας 13

GHG	GWP
CO <sub>2</sub>	1
N <sub>2</sub> O	298
CH <sub>4</sub>	25

Πίνακας 13: Δυναμικό παγκόσμιας θέρμανσης (Ricardo-AEA, 2014)

Ο συντελεστής εξωτερικού κόστους για τα GHG έχει τρεις τιμές, σύμφωνα με το Διάγραμμα 14 (CE Delft, 2011).



Διάγραμμα 14: Εξωτερικό κόστος GHG (CE Delft, 2011)

Value	GHG (EUROS/tn CO <sub>2</sub> e)
Lower	13
Central	38
Upper	66

Πίνακας 14: Συντελεστής εξωτερικού κόστους αερίων του θερμοκηπίου (CE Delft, 2011)

Σημειώνεται ότι στη παρούσα εργασία δεν λαμβάνεται υπόψη η ατμοσφαιρική διασπορά των ρύπων από την πηγή που δημιουργήθηκαν.

# 7. Περιγραφή υπολογιστικού προγράμματος

---

## 7.1 Υπολογιστικό περιβάλλον MATLAB

Για την ανάπτυξη του υπολογιστικού εργαλείου που θα εξυπηρετεί τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής MATLAB (matrix laboratory). Το MATLAB είναι ένα διαδραστικό σύστημα που χρησιμοποιεί ως βασικά στοιχεία πίνακες, οι οποίοι δεν χρειάζονται διαστασιολόγηση, γεγονός που επιτρέπει να λύνει υπολογιστικά προβλήματα που εμπεριέχουν πίνακες και διανυσματικές διατυπώσεις.

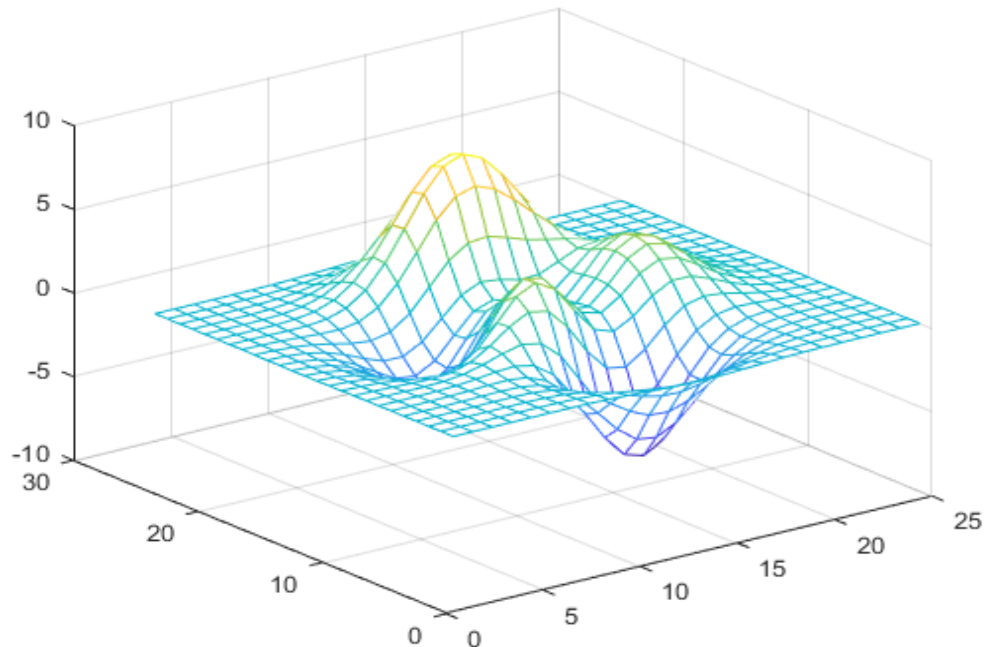
Το MATLAB χρησιμοποιείται κυρίως για την πραγματοποίηση υπολογισμών και την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων, αλλά και για προγραμματισμό σε ένα εύχρηστο περιβάλλον, καθώς περιέχει εντολές από την C++, καθιστώντας το ταυτόχρονα μία υψηλής επίδοσης προγραμματιστική γλώσσα τέταρτης γενιάς.

Το MATLAB έχει εξελιχθεί με το πέρασμα του χρόνου διευρύνοντας το πεδίο εφαρμογής του. Με την δυνατότητά του να υλοποιεί συναρτήσεις πραγματικές, μιγαδικές και πεπλεγμένες συναρτήσεις δύο μεταβλητών, αλλά και ιστογράμματα, τομεογράμματα, ραβδογράμματα και εμβοδογράμματα, αποτελεί βασικό εργαλείο στον κλάδο των μαθηματικών, μηχανικής και επιστημών. Επιπροσθέτως, το MATLAB περιέχει εργαλείοι, δηλαδή περιεκτικές συλλογές συναρτήσεων, που του επιτρέπουν να επιλύει προβλήματα εξειδικευμένων τεχνολογιών, όπως επεξεργασία σήματος, συστήματα ελέγχου, ασαφής λογική, νευρωνικά δίκτυα και προσομοίωση.

Το σύστημα MATLAB αποτελείται από πέντε βασικά μέρη:

- Η γλώσσα MATLAB, η οποία είναι μία υψηλού επιπέδου γλώσσα με εντολές ελέγχου ροής, συναρτήσεις, δομές δεδομένων, εντολές εισόδου και εξόδου και χαρακτηριστικά αντικειμενοστραφή προγραμματισμού.
- Το περιβάλλον εργασίας MATLAB, το οποίο αποτελεί το περιβάλλον που επιτρέπει στον χρήστη να χρησιμοποιεί τα εργαλεία του MATLAB.
- Τα γραφικά, τα οποία αποτελούν το σύστημα γραφικών του MATLAB, το οποίο περιέχει υψηλού επιπέδου εντολές για δισδιάστατη και τρισδιάστατη απεικόνιση δεδομένων, επεξεργασία εικόνας και παρουσίαση γραφικών παραστάσεων.
- Η βιβλιοθήκη μαθηματικών συναρτήσεων MATLAB, η οποία περιέχει μια μεγάλη συλλογή υπολογιστικών αλγορίθμων και εκτείνεται από πολύ βασικές λειτουργίες (πρόσθεση, ημίτονο, συνημίτονο) έως περισσότερο εξειδικευμένες (αναστροφή πινάκων, μετασχηματισμό Fourier).

- Η διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών MATLAB (*Application Program Interface, API*), η οποία είναι μία βιβλιοθήκη που επιτρέπει την αλληλεπίδραση μεταξύ του MATLAB και άλλων γλωσσών προγραμματισμού (C και Fortran).



Εικόνα 2: Τρισδιάστατη απεικόνιση επιφάνειας MATLAB

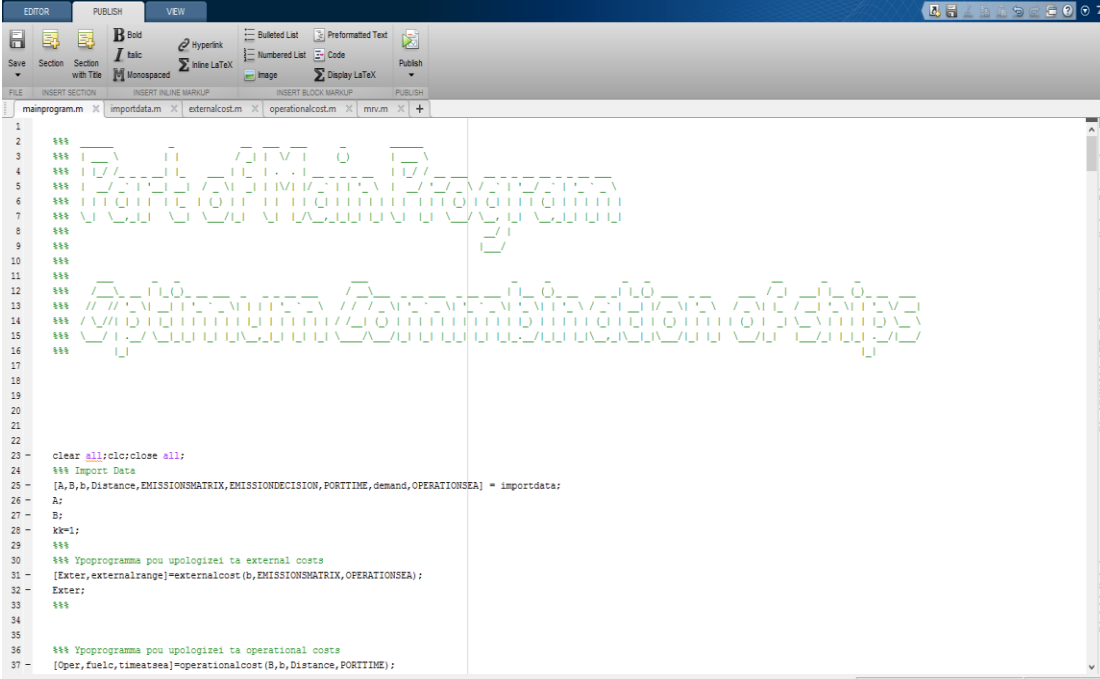
## 7.2 Περιγραφή του υπολογιστικού εργαλείου

Το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας σε περιβάλλον MATLAB αποτελείται από 1330 γραμμές κώδικα, οι οποίες αντιστοιχούν σε έξι αρχεία (m-files). Από αυτά το ένα αρχείο είναι το κύριο πρόγραμμα, μέσα από το οποίο καλούνται τα υπόλοιπα τέσσερα αρχεία συναρτήσεων, σύμφωνα με τις εισόδους του χρήστη.

Συγκεκριμένα τα ονόματα και τα είδη των αρχείων είναι:

- mainprogram.m            (*Script file*)
- importdata.m            (*Function file*)
- operationalcost.m        (*Function file*)
- externalcost.m           (*Function file*)
- mrv.m                    (*Function file*)
- diagrams.m               (*Function file*)

Το πρόγραμμα είναι πλήρως διαδραστικό, δηλαδή ζητάει και δέχεται τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου, μέσα από πλαίσια διαλόγου, ώστε να εκτελέσει τους υπολογισμούς που απαιτούνται. Αξίζει να σημειωθεί ότι όλα τα πλαίσια διαλόγου είναι γραμμένα σε αγγλική γλώσσα, ενώ ταυτόχρονα διευκρινίζονται οι μονάδες για κάθε τιμή που ζητείται να εισαχθεί από τον χρήστη. Όλα τα παραπάνω καθιστούν την χρήση του προγράμματος ευκολότερη, αλλά και φιλικότερη για χρήστες οι οποίοι δεν είναι εξοικειωμένοι με τον προγραμματισμό.



```

1
2 %%%
3
4 %%%
5
6 %%%
7
8 %%%
9
10 %%%
11
12 %%%
13
14 %%%
15
16 %%%
17
18
19
20
21
22
23 clear all;close all;
24 %%% Import Data
25 [A,B,b,Distance,EMISSIONMATRIX,EMISSIONDECISION,FORTIME,demand,OPERATIONSEA] = importdata;
26 A;
27 B;
28 kK=1;
29 %%%
30 %%% Προγραμμα που υπολογίζει τα external costs
31 [Exter,externalange]=externalcost(B,EMISSIONMATRIX,OPERATIONSEA);
32 Exter;
33 %%%
34
35 %%% Προγραμμα που υπολογίζει τα operational costs
36 [Oper,fuelc,timestsea]=operationalcost(B,b,Distance,FORTIME);
37

```

Εικόνα 3: Μέρος του κώδικα του υπολογιστικού εργαλείου (Στιγμιότυπο οθόνης)

### 7.2.1 Περιγραφή αρχείων

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται οι λειτουργίες που εκτελούνται από τα αρχεία του υπολογιστικού προγράμματος.

#### Αρχείο mainprogram.m

Όπως αναφέρθηκε ήδη παραπάνω, το αρχείο αυτό αποτελεί το κύριο πρόγραμμα από το οποίο καλούνται όλα τα υπόλοιπα αρχεία.

Αρχικά, καλείται το αρχείο *importdata.m* και μετά τα αρχεία *externalcost.m* και *operationalcost.m*. Στη συνέχεια, το πρόγραμμα υπολογίζει και βρίσκει όλους τους διαφορετικούς συνδυασμούς πλοίων, οι οποίοι δύναται να προκύψουν από τον στόλο που του έχει δώσει ο χρήστης. Έπειτα, εμφανίζεται στην οθόνη πλαίσιο διαλόγου, στο οποίο ο χρήστης καλείται να επιλέξει το κριτήριο βάσει του οποίου θα υπολογιστεί ο βέλτιστος συνδυασμός πλοίων. Τα κριτήρια που εμφανίζονται είναι:



- Emissions (Αναφέρεται στο είδος των εκπομπών το οποίο έχει επιλέξει ο ίδιος ο χρήστης παραπάνω)
- External Cost
- Operational Cost

Επίσης, βάσει του φορτίου που απαιτείται να μεταφερθεί κατά τη διάρκεια ενός έτους, το οποίο έχει ήδη οριστεί ως δεδομένο εισόδου από τον χρήστη, απορρίπτονται όσοι συνδυασμοί αδυνατούν να ικανοποιήσουν την απαίτηση αυτή σε ένα έτος. Για κάθε έναν από τους υπόλοιπους συνδυασμούς, τα πλοία του φορτώνονται διαδοχικά με τρεις διαφορετικούς τρόπους έως ότου ικανοποιήσουν την απαίτηση και στο τέλος επιλέγεται ο βέλτιστος. Οι τρεις τρόποι φόρτωσης των πλοίων για κάθε συνδυασμό είναι οι εξής:

- Βάσει του επιλεγμένου κριτηρίου κατά αύξουσα σειρά.
- Βάσει του λόγου μονάδα κριτηρίου ανά μονάδα μεταφερόμενου φορτίου κατά αύξουσα σειρά.
- Βάσει του μεταφερόμενου φορτίου κατά φθίνουσα σειρά.

Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια της διαδικασίας που περιγράφηκε παραπάνω, το πρόγραμμα απορρίπτει τους συνδυασμούς στους οποίους το πλοίο που εκτελεί το τελευταίο δρομολόγιο είναι πάνω από 60% άδειο, καθώς θεωρήθηκε ως μη αποδεκτή λύση.

Οι συνδυασμοί που προκύπτουν ταξινομούνται με βάση το κριτήριο, ενώ καλείται η συνάρτηση *mn.m*, εφόσον οι υπό εξέταση ρύποι αφορούν το διοξείδιο του άνθρακα CO<sub>2</sub>.

Τέλος, δημιουργούνται οι βασικοί πίνακες του προγράμματος για τον βέλτιστο συνδυασμό, ενώ μέσω της συνάρτησης *diagrams.m* σχεδιάζονται κάποια διαγράμματα.

### **Αρχείο *importdata.m***

Η συνάρτηση *importdata.m*, η οποία καλείται στην αρχή του κύριου προγράμματος, ουσιαστικά ζητά από τον χρήστη και διαχειρίζεται όλα τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου για να πραγματοποιηθούν οι αναγκαίοι υπολογισμοί. Συγκεκριμένα, εμφανίζονται οκτώ πλαίσια διαλόγου, από τα οποία τα τρία πρώτα αφορούν στο σενάριο λειτουργίας ( απόσταση , απαιτούμενο μεταφερόμενο φορτίο και επιλογή θαλάσσιας περιοχής λειτουργίας). Σημειώνεται ότι οι επιλογές της θάλασσας περιοχής είναι οι εξής:

- Βαλτική Θάλασσα (Baltic Sea)
- Μαύρη Θάλασσα (Black Sea)
- Μεσόγειος Θάλασσα (Mediterranean Sea)

- Βόρεια Θάλασσα (North Sea)
- Υπόλοιπος Νότιος-Δυτικός Ατλαντικός Ωκεανός (Remaining North-East Atlantic)

Τα επόμενα τέσσερα πλαίσια διαλόγου αφορούν στα πλοία που περιέχει ο στόλος που εξετάζεται (αριθμός πλοίων, βασικά χαρακτηριστικά, χαρακτηριστικά μηχανολογικής εγκατάστασης και εκπομπές κάθε πλοίου), ενώ το τελευταίο ζητά να επιλεγθεί ο βασικός υπό εξέταση ρύπος στη συνέχεια του προγράμματος.

Παράλληλα, υπολογίζεται ο μέγιστος αριθμός ταξιδιών, τα οποία μπορεί να εκτελέσει το κάθε πλοίο στη διάρκεια ενός έτους. Αξίζει να σημειωθεί ότι ως ταξίδι ορίζεται η μετακίνηση του πλοίου από ένα λιμάνι σε κάποιο άλλο και η επιστροφή του στο πρώτο.

Τελικά, όλα τα παραπάνω δεδομένα αποθηκεύονται σε πίνακες και λαμβάνονται από το κύριο πρόγραμμα.

#### **Αρχείο `operationalcost.m`**

Η συνάρτηση αυτή υπολογίζει το κόστος των καυσίμων ενός ταξιδιού (όπως αυτό ορίζεται παραπάνω) για κάθε πλοίο του στόλου. Θεωρείται ότι κάθε πλοίο ανεφοδιάζεται με καύσιμα τόσο στο λιμάνι αναχώρησης, όσο και στο λιμάνι άφιξης. Επίσης, σημειώνεται ότι η τιμή ανά τόνο καυσίμου για κάθε ένα από τα τρία καύσιμα (HFO, MDO, LNG) και για τα δύο λιμάνια έχει οριστεί σύμφωνα με την ιστοσελίδα «<https://shipandbunker.com/prices/apac>» (τιμές Ιανουαρίου 2018). Τελικά, οι τιμές αυτές αποθηκεύονται σε πίνακα τον οποίο χρησιμοποιεί το κύριο πρόγραμμα.

#### **Αρχείο `externalcost.m`**

Η συνάρτηση αυτή υπολογίζει το εξωτερικό κόστος ενός ταξιδιού (όπως αυτό ορίζεται παραπάνω) για κάθε πλοίο του στόλου. Οι τιμές ανά τόνο εκπομπών εξαρτώνται από τη θαλάσσια περιοχή που έχει επιλέξει ο χρήστης.

Επίσης, με κατάλληλο πλαίσιο διαλόγου ο χρήστης καλείται να επιλέξει την τιμή του κόστους ανά τόνο εκπομπής του διοξειδίου του άνθρακα (Minimum, Average, Maximum). Τελικά, οι τιμές αυτές αποθηκεύονται σε πίνακα τον οποίο χρησιμοποιεί το κύριο πρόγραμμα.

#### **Αρχείο `mrn.m`**

Η συνάρτηση αυτή καλείται από το κύριο πρόγραμμα, αφού έχει βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός πλοίων που εξυπηρετεί το δοθέν σενάριο λειτουργίας και μόνο εφόσον ο βασικός υπό εξέταση ρύπος είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Σκοπός της είναι να εξαχθούν τα αποτελέσματα των βέλτιστων συνδυασμών σύμφωνα με τον κανονισμό Παρακολούθησης –Αναφοράς –Πιστοποίησης (*Monitoring –*

*Reporting – Verification, MRV regulation*), όπως αυτός ορίζεται από τους νηογνώμονες. Τα δεδομένα που απαιτούνται να καταγράφονται από τον MRV μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες ανά διαδρομή και ανά έτος και παρουσιάζονται στον Πίνακα 15.

Ανά διαδρομή	Ανά έτος
Καταναλισκόμενη ποσότητα καυσίμου	Συνολική καταναλισκόμενη ποσότητα καυσίμου
Εκπεμπόμενη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα	Συνολική εκπεμπόμενη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα
Διανυθείσα απόσταση	Συνολική διανυθείσα απόσταση
Χρόνος εν πλω	Συνολικός χρόνος εν πλω
Μεταφερόμενο φορτίο	Συνολικό μεταφερόμενο φορτίο
Μεταφορικό έργο (φορτίο × απόσταση)	Συνολικό μεταφορικό έργο
	Μέση ενεργειακή απόδοση

Πίνακας 15: Δεδομένα που απαιτούνται να καταγράφονται από τον Κανονισμό MRV (ClassNK, 2017)

Η μέση ενεργειακή απόδοση περιγράφεται από τους νηογνώμονες όπως φαίνεται παρακάτω:

- Ετήσια καταναλισκόμενη ποσότητα καυσίμου/ Συνολική διανυθείσα απόσταση
- Ετήσια καταναλισκόμενη ποσότητα καυσίμου/ Συνολικό μεταφορικό έργο
- Ετήσια εκπεμπόμενη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα/ Συνολική διανυθείσα απόσταση
- Ετήσια εκπεμπόμενη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα/ Συνολικό μεταφορικό έργο

Ως διαδρομή ορίζεται οποιαδήποτε μετακίνηση του πλοίου από ένα λιμάνι, στο οποίο φορτώνεται ή εκφορτώνεται φορτίο, σε άλλο λιμάνι, στο οποίο φορτώνεται ή εκφορτώνεται φορτίο.

Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, η συνάρτηση *mrn.m* αποθηκεύει τα παραπάνω δεδομένα για κάθε πλοίο των συνδυασμών ανά ταξίδι αλλά και ανά έτος λειτουργίας. Επίσης, υπολογίζει τα συνολικά δεδομένα όλων των πλοίων κάθε συνδυασμού. Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα εξάγονται σε τρεις διαφορετικούς πίνακες στο κύριο πρόγραμμα.

### Αρχείο *diagrams.m*

Η συνάρτηση αυτή καλείται στο τέλος του κύριου προγράμματος και σχεδιάζει δύο διαγράμματα. Το πρώτο απεικονίζει τον Δείκτη EEDI κάθε πλοίου που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και την καμπύλη αναφοράς του Δείκτη EEDI, όπως αυτή ορίζεται από τον IMO, ενώ το δεύτερο απεικονίζει τις εκπομπές διοξειδίου του

αζώτου κάθε πλοίου ανά kWh σε συνδυασμό με τα όρια που ορίζουν οι ισχύοντες κανονισμοί.

### 7.2.2 Δεδομένα εισόδου

Για τη λειτουργία του υπολογιστικού προγράμματος απαιτείται η εισαγωγή δεδομένων εισόδου (inputs) από τον χρήστη, που αφορούν τόσο το σενάριο λειτουργίας όσο και τα πλοία του στόλου που εξετάζονται. Στους Πίνακας 16 και Πίνακας 17 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα απαιτούμενα δεδομένα εισόδου ανά κατηγορία.

#### Δεδομένα εισόδου - Σενάριο λειτουργίας

Τύπος	Μονάδα μέτρησης
Distance of trip	nm
Cargo to be transported	tn
Sea region	-

Πίνακας 16: Δεδομένα εισόδου σεναρίου λειτουργίας

#### Δεδομένα εισόδου - Πλοία στόλου

Τύπος	Μονάδα μέτρησης
Number of ships	-
<i>Χαρακτηριστικά πλοίου κάθε πλοίου</i>	
Deadweight	tn
Payload	tn
Actual speed	kn
Service speed	kn
Special fuel oil consumption	kg/Kwh
Number of main engines	-
Number of auxiliary engine	-
Fuel type	-
Age	Years
Time at port	Hours
<i>Χαρακτηριστικά μηχανολογικής εγκατάστασης κάθε πλοίου</i>	
MCR of main engines	kW
MCR of auxiliary engines	kW
<i>Εκπομπές κάθε πλοίου για ταξίδι μετ' επιστροφής</i>	
CO <sub>2</sub>	tn
NO <sub>x</sub>	tn
SO <sub>x</sub>	tn
PM	tn
CO	tn
CH <sub>4</sub>	tn
N <sub>2</sub> O	tn
NMVOC	tn

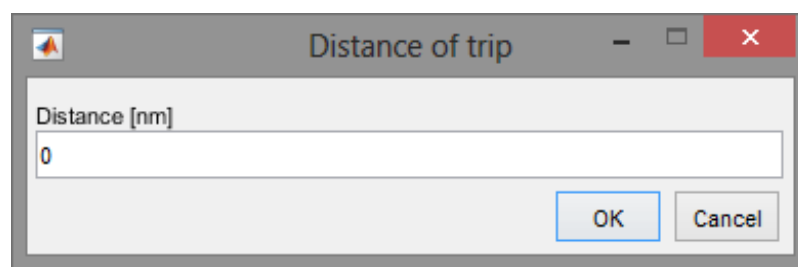
Πίνακας 17: Δεδομένα εισόδου για κάθε πλοίο του στόλου

Σημειώνεται ότι οι εκπομπές κάθε πλοίου αφορούν τις συνολικές εκπομπές κάθε ρύπου ανά ταξίδι, όπως αυτό ορίστηκε παραπάνω, δηλαδή ως η μετακίνηση του πλοίου από ένα λιμάνι σε κάποιο άλλο και η επιστροφή του στο πρώτο.

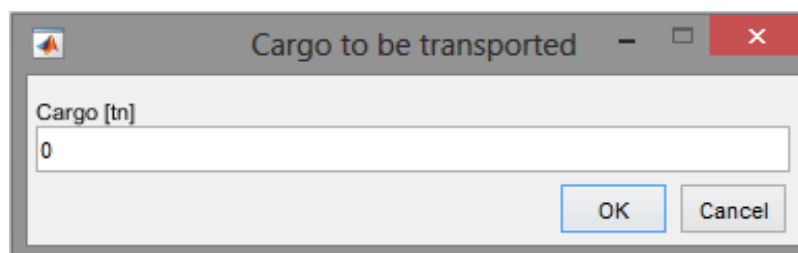
### 7.3 Γραφικό περιβάλλον και πλαίσια διαλόγου

Το πρόγραμμα, το οποίο αναπτύχθηκε, σχεδιάστηκε έτσι ώστε η χρήση του να είναι εφικτή και εύκολη ακόμα και για χρήστες που δεν διαθέτουν ιδιαίτερες γνώσεις στον προγραμματισμό. Αυτό επιτεύχθηκε με την χρήση κατάλληλων πλαισίων διαλόγου, γραμμένων στην Αγγλική γλώσσα, τα οποία ζητούν από τον χρήστη να εισάγει τα δεδομένα που είναι απαραίτητα για τους υπολογισμούς. Επισημαίνεται ότι, στα πλαίσια διαλόγου που εμφανίζονται κατά τη χρήση του προγράμματος, διευκρινίζονται οι μονάδες των μεγεθών, όπου αυτό είναι αναγκαίο.

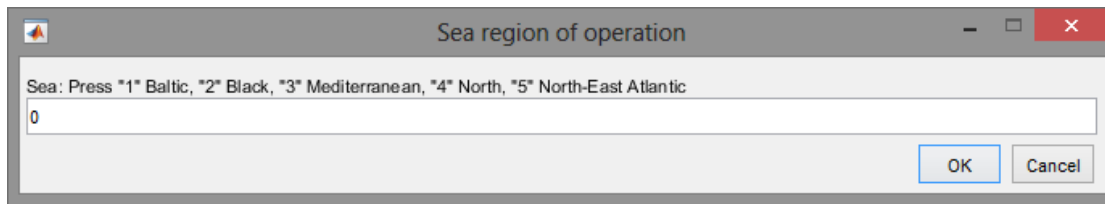
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα πλαίσια διαλόγου με τη σειρά που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία του υπολογιστικού εργαλείου.



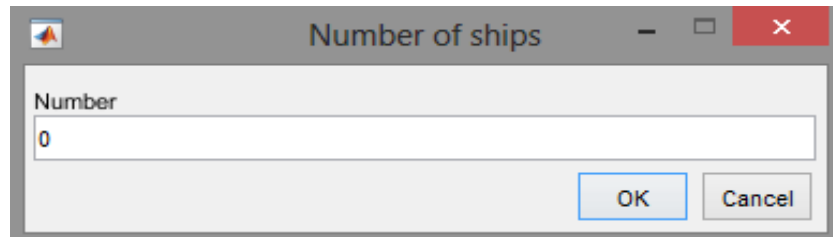
Εικόνα 4: Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού εργαλείου- Απόσταση ταξιδιού (Στιγμιότυπο οθόνης)



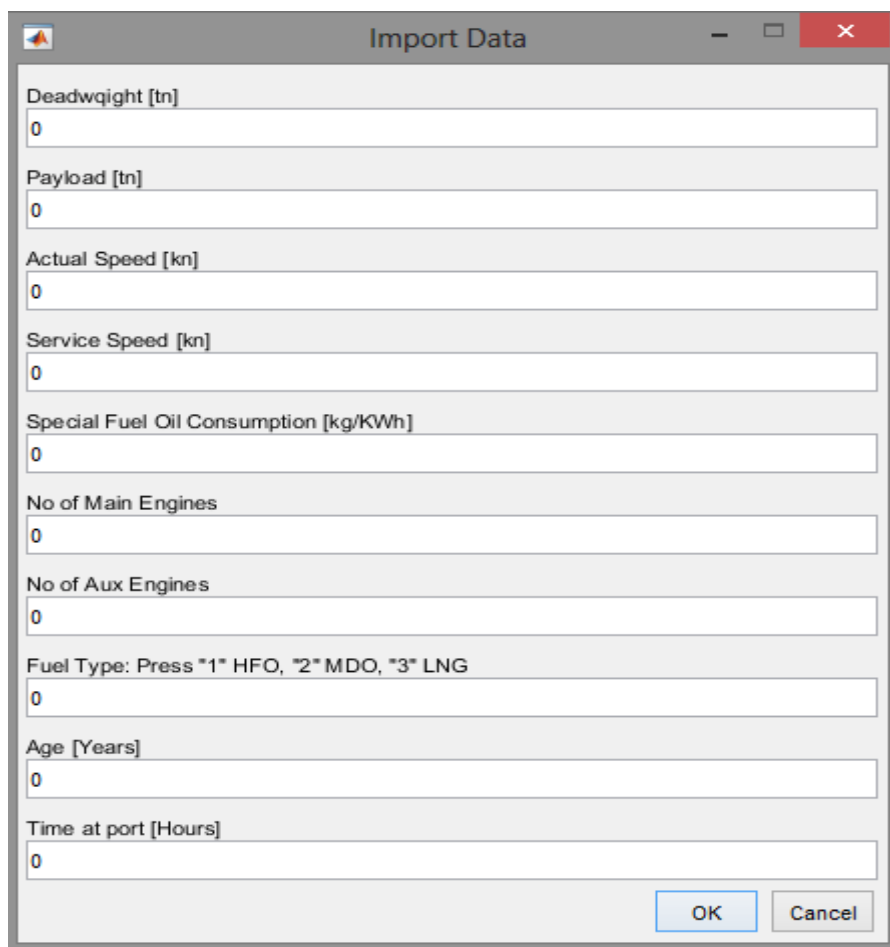
Εικόνα 5: Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού εργαλείου- Απαίτηση μεταφερόμενου φορτίου (Στιγμιότυπο οθόνης)



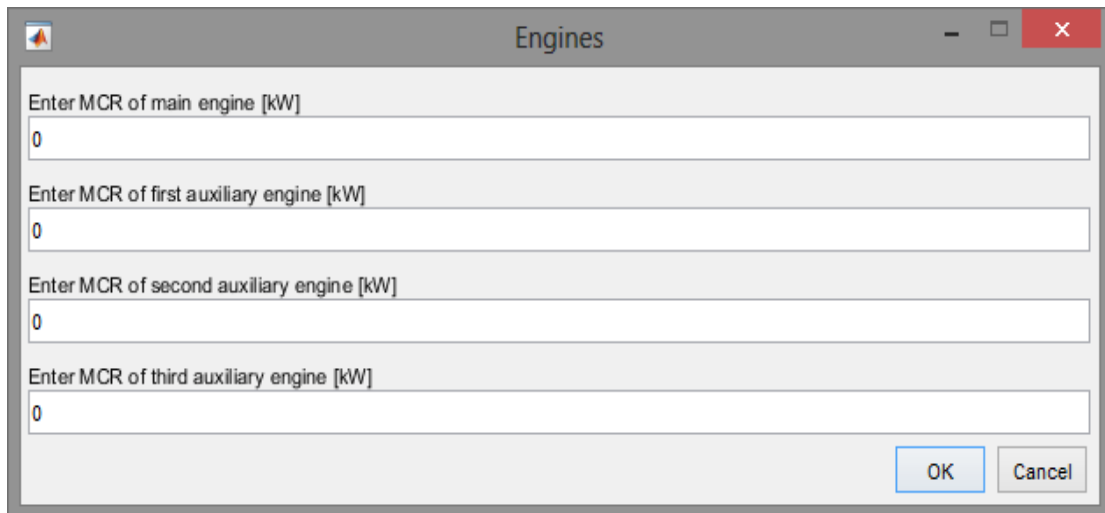
Εικόνα 6: Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού εργαλείου- Θάλασσα λειτουργίας (Στιγμιότυπο οθόνης)



Εικόνα 7: Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού εργαλείου- Αριθμός πλοίων στόλου (Στιγμιότυπο οθόνης)



Εικόνα 8: Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού εργαλείου- Κύρια χαρακτηριστικά πλοίου (Στιγμιότυπο οθόνης)



Engines

Enter MCR of main engine [kW]  
0

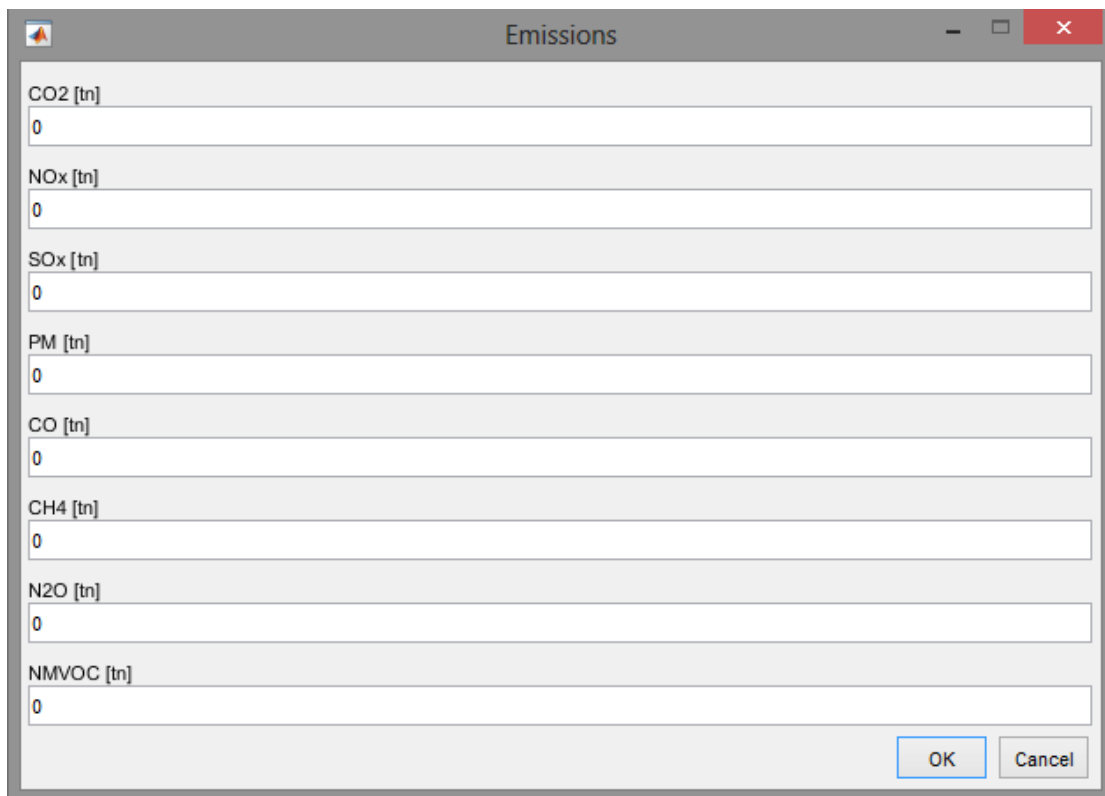
Enter MCR of first auxiliary engine [kW]  
0

Enter MCR of second auxiliary engine [kW]  
0

Enter MCR of third auxiliary engine [kW]  
0

OK Cancel

Εικόνα 9: Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού εργαλείου- Χαρακτηριστικά κύριων και βοηθητικών μηχανών πλοίου (Στιγμιότυπο οθόνης)



Emissions

CO2 [tn]  
0

NOx [tn]  
0

SOx [tn]  
0

PM [tn]  
0

CO [tn]  
0

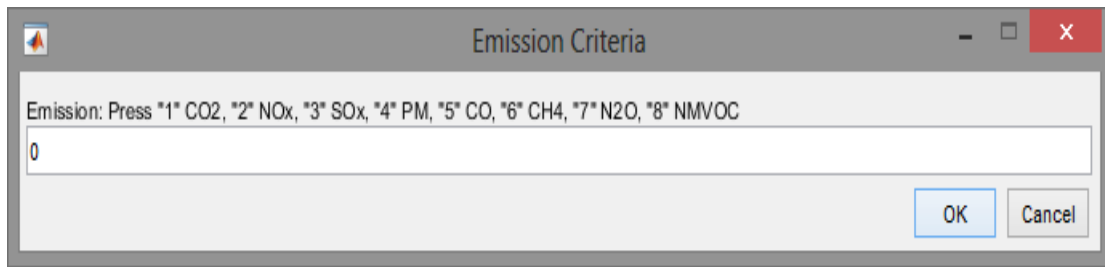
CH4 [tn]  
0

N2O [tn]  
0

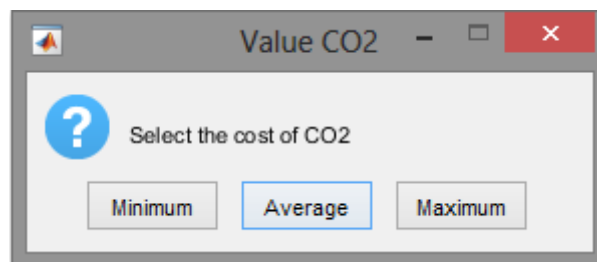
NMVOC [tn]  
0

OK Cancel

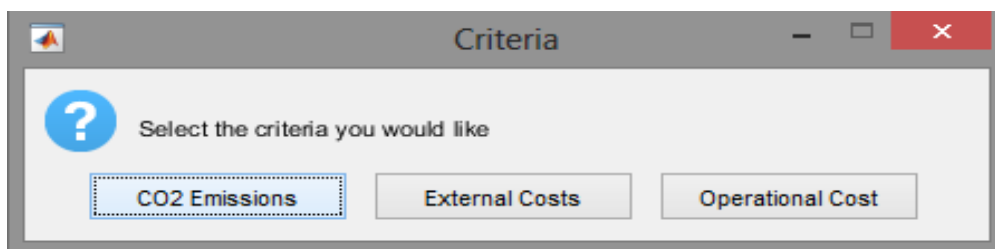
Εικόνα 10: Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού εργαλείου- Εκπομπές πλοίου (Στιγμιότυπο οθόνης)



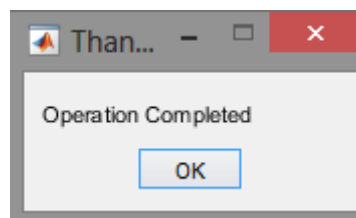
**Εικόνα 11:** Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού εργαλείου- Υπό εξέταση ρύπος (Στιγμιότυπο οθόνης)



**Εικόνα 12:** Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού εργαλείου- Τιμή κόστους διοξειδίου του άνθρακα (Στιγμιότυπο οθόνης)



**Εικόνα 13:** Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού εργαλείου- Κριτήριο (Στιγμιότυπο οθόνης)



**Εικόνα 14:** Πλαίσιο διαλόγου υπολογιστικού εργαλείου- Τερματισμός υπολογιστικού εργαλείου (Στιγμιότυπο οθόνης)



## 8. Σενάριο/α ανάλυσης

### 8.1 Περιγραφή των υπό μελέτη στόλων

Η εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου έγινε για περίπτωση στόλων που απαρτίζονται από πραγματικά πλοία με στοιχεία από βάσεις δεδομένων. Ο πρώτος στόλος αποτελείται από πέντε πλοία Bulk Carrier Capesize με μεγάλο εύρος DWT, ενώ ο δεύτερος στόλος από πέντε πλοία Bulk Carrier Capesize, τα οποία έχουν κοντινό DWT.

Στον Πίνακα 18 και στον Πίνακα 19 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι κύριες διαστάσεις και τα βασικά χαρακτηριστικά του πρώτου και του δεύτερου στόλου αντίστοιχα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για να μπορούν να συγκριθούν οι στόλοι, επιλέχθηκαν έτσι ώστε να έχουν σχεδόν ίδιο συνολικό DWT.

$$|\Delta DWT| = |DWT_{\text{Στόλος1}} - DWT_{\text{Στόλος2}}| = |787530 - 789492| = 1962 t$$

**Στόλος 1**

Type Name	Bulk Carrier				
	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5
LBP [m]	291.50	290.00	294.00	234.00	226.00
B [m]	50.00	50.00	47.50	42.00	38.00
D [m]	25.00	25.10	24.70	23.00	20.00
T [m]	17.94	18.12	18.02	15.70	13.90
C <sub>B</sub>	0.853	0.848	0.835	0.808	0.852
DWT [tn]	199988	199995	187882	109773	89892
LS [tn]	29053	28956	27848	18400	14638
Δ [tn]	229041	228951	215730	128173	104530
Payload [tn]	192041	191780	180772	104956	82929
Number of bulkheads	11	11	11	11	9
Service speed [kn]	14.3	15.4	15.0	14.5	14.3
Age of ship [years]	1	1	1	18	4
Main Engine (Number)	1	1	1	1	1
Auxiliary Engines (Number)	3	3	3	3	3
Main Engine [kW]	18200	18200	18760	11620	9960
Auxiliary Engines [kW]	900	900	880	750	750

Πίνακας 18: Κύριες διαστάσεις και χαρακτηριστικά 1<sup>ου</sup> στόλου

## Στόλος 2

Type Name	Bulk Carrier				
	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10
LBP [m]	279.02	279.02	256.57	265.74	259.00
B [m]	45.00	45.00	43.00	45.00	43.00
D [m]	24.20	24.20	23.90	22.70	23.80
T [m]	17.80	17.80	17.42	16.53	17.32
C <sub>B</sub>	0.853	0.852	0.856	0.839	0.840
DWT [tn]	169126	169234	150966	151252	148914
LS [tn]	26646	26548	18046	22800	17493
Δ [tn]	195772	195782	169012	174052	166407
Payload [tn]	165266	165265	144379	144250	142307
Number of bulkheads	11	11	11	9	11
Service speed [kn]	14.8	14.8	14.4	14.0	14.2
Age of ship [years]	20	13	21	24	21
Main Engine (Number)	1	1	1	1	1
Auxiliary Engines (Number)	3	3	3	3	3
Main Engine [kW]	18760	18760	13062	11550	12836
Auxiliary Engines [kW]	880	880	800	800	800

Πίνακας 19: Κύριες διαστάσεις και χαρακτηριστικά 2<sup>ου</sup> στόλου

Επιπλέον, στον Πίνακα 20 καταγράφονται οι ειδικές καταναλώσεις καυσίμου των πλοίων των δύο στόλων ανάλογα με τον τύπο του καυσίμου.

## SFOC [kg/kWh]

Type of fuel	H.F.O.	M.D.O.	L.N.G.
Πλοίο 1	0.167	0.167	0.138
Πλοίο 2	0.169	0.169	0.140
Πλοίο 3	0.167	0.167	0.138
Πλοίο 4	0.170	0.170	0.140
Πλοίο 5	0.172	0.172	0.142
Πλοίο 6	0.167	0.167	0.138
Πλοίο 7	0.167	0.167	0.138
Πλοίο 8	0.170	0.170	0.140
Πλοίο 9	0.169	0.169	0.139
Πλοίο 10	0.170	0.170	0.140

Πίνακας 20: Ειδική κατανάλωση καυσίμου κάθε πλοίου

Στους Πίνακες 21, Πίνακας 22, Πίνακας 23, Πίνακας 24, Πίνακας 25 και Πίνακας 26 παρουσιάζονται οι αέριες εκπομπές του Στόλου 1 και του Στόλου 2 για ταχύτητα

11.5 κόμβων (Σενάριο ταχυτήτων 1), για τα τρία διαφορετικά καύσιμα (HFO, MDO, LNG), οι οποίες υπολογίστηκαν από υπολογιστικό πρόγραμμα σε γλώσσα MATLAB (Δασκαλάκης, 2015).

#### Αέριες εκπομπές Στόλος 1 με καύσιμο HFO - Σενάριο 1 [tn]

Name	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5
CO <sub>2</sub>	3709.08	3121.59	3360.25	2412.75	2220.57
NO <sub>x</sub>	93.45	78.65	84.66	60.79	55.95
SO <sub>x</sub>	58.46	49.20	52.96	38.03	35.00
PM	8.33	7.01	7.54	5.42	4.98
CO	3.30	2.78	2.99	2.15	1.98
CH <sub>4</sub>	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04
N <sub>2</sub> O	0.19	0.16	0.17	0.12	0.11
NMVOC	3.67	3.09	3.32	2.39	2.20

Πίνακας 21: Αέριες εκπομπές 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO

#### Αέριες εκπομπές Στόλος 1 με καύσιμο MDO - Σενάριο 1 [tn]

Name	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5
CO <sub>2</sub>	3818.66	3213.82	3459.53	2484.03	2286.18
NO <sub>x</sub>	87.84	73.93	79.58	57.14	52.59
SO <sub>x</sub>	3.14	2.65	2.85	2.05	1.88
PM	1.21	1.02	1.10	0.79	0.73
CO	3.30	2.78	2.99	2.15	1.98
CH <sub>4</sub>	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04
N <sub>2</sub> O	0.18	0.15	0.16	0.12	0.11
NMVOC	3.67	3.09	3.32	2.39	2.20

Πίνακας 22: Αέριες εκπομπές 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO

#### Αέριες εκπομπές Στόλος 1 με καύσιμο LNG - Σενάριο 1 [tn]

Name	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5
CO <sub>2</sub>	2800.84	2376.65	2543.53	1830.00	1692.28
NO <sub>x</sub>	7.97	6.77	7.24	5.21	4.82
SO <sub>x</sub>	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
PM	0.18	0.16	0.17	0.12	0.11
CO	7.97	6.77	7.24	5.21	4.82
CH <sub>4</sub>	52.15	44.25	47.36	34.07	31.51
N <sub>2</sub> O	0.11	0.10	0.10	0.07	0.07
NMVOC	3.07	2.60	2.78	2.00	1.85

Πίνακας 23: Αέριες εκπομπές 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG

#### Αέριες εκπομπές Στόλος 2 με καύσιμο HFO - Σενάριο 1 [tn]

Name	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10
CO <sub>2</sub>	3467.86	3467.86	2743.61	2647.36	2797.84
NO <sub>x</sub>	87.38	87.38	69.13	66.70	70.49
SO <sub>x</sub>	54.66	54.66	43.24	41.73	44.10
PM	7.78	7.78	6.16	5.94	6.28
CO	3.08	3.08	2.44	2.35	2.49
CH <sub>4</sub>	0.07	0.07	0.05	0.05	0.05
N <sub>2</sub> O	0.18	0.18	0.14	0.14	0.14

NMVOC	3.43	3.43	2.71	2.62	2.77
-------	------	------	------	------	------

Πίνακας 24: Αέριες εκπομπές 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO**Αέριες εκπομπές Στόλος 2 με καύσιμο MDO - Σενάριο 1 [tn]**

Name	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10
CO <sub>2</sub>	3570.31	3570.31	2824.67	2725.57	2880.50
NO <sub>x</sub>	82.13	82.13	64.98	62.70	66.26
SO <sub>x</sub>	2.94	2.94	2.33	2.24	2.37
PM	1.14	1.14	0.90	0.87	0.92
CO	3.08	3.08	2.44	2.35	2.49
CH <sub>4</sub>	0.07	0.07	0.05	0.05	0.05
N <sub>2</sub> O	0.17	0.17	0.13	0.13	0.13
NMVOC	3.43	3.43	2.71	2.62	2.77

Πίνακας 25: Αέριες εκπομπές 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO**Αέριες εκπομπές Στόλος 2 με καύσιμο LNG - Σενάριο 1 [tn]**

Name	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10
CO <sub>2</sub>	2621.14	2621.14	2077.78	2005.81	2117.10
NO <sub>x</sub>	7.46	7.46	5.92	5.71	6.03
SO <sub>x</sub>	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
PM	0.17	0.17	0.14	0.13	0.14
CO	7.46	7.46	5.92	5.71	6.03
CH <sub>4</sub>	48.80	48.80	38.68	37.34	39.42
N <sub>2</sub> O	0.10	0.10	0.08	0.08	0.08
NMVOC	2.87	2.87	2.27	2.20	2.32

Πίνακας 26: Αέριες εκπομπές 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG

Στη συνέχεια στους Πίνακας 27, Πίνακας 28, Πίνακας 29, Πίνακας 30, Πίνακας 31 και Πίνακας 32 παρουσιάζονται οι αέριες εκπομπές κάθε στόλου για διαφορετική αυξημένη ταχύτητα κάθε πλοίου (Σενάριο ταχυτήτων 2), όπως παρουσιάζεται στον Πίνακας 33, για τα τρία διαφορετικά καύσιμα, οι οποίες υπολογίστηκαν από υπολογιστικό πρόγραμμα σε γλώσσα MATLAB (Δασκαλάκης, 2015).

**Αέριες εκπομπές Στόλος 1 με καύσιμο HFO - Σενάριο 2 [tn]**

Name	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5
CO <sub>2</sub>	3815.56	3803.44	3692.42	2763.61	2307.45
NO <sub>x</sub>	96.14	95.83	93.03	70.64	58.14
SO <sub>x</sub>	60.14	59.95	58.20	44.19	36.37
PM	8.56	8.54	8.29	6.29	5.18
CO	3.39	3.38	3.28	2.49	2.05
CH <sub>4</sub>	0.07	0.07	0.07	0.05	0.04
N <sub>2</sub> O	0.20	0.20	0.19	0.14	0.12
NMVOC	3.77	3.76	3.65	2.77	2.28

Πίνακας 27: Αέριες εκπομπές 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO για το 2<sup>ο</sup> σενάριο ταχυτήτων**Αέριες εκπομπές Στόλος 1 με καύσιμο MDO - Σενάριο 2 [tn]**

Name	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5
------	---------	---------	---------	---------	---------

CO <sub>2</sub>	3928.29	3915.81	3801.51	2840.44	2375.62
NO <sub>x</sub>	90.37	90.08	87.45	66.40	54.65
SO <sub>x</sub>	3.23	3.22	3.13	2.38	1.96
PM	1.25	1.25	1.21	0.92	0.76
CO	3.39	3.38	3.28	2.49	2.05
CH <sub>4</sub>	0.07	0.07	0.07	0.05	0.04
N <sub>2</sub> O	0.18	0.18	0.18	0.14	0.11
NMVOC	3.77	3.76	3.65	2.77	2.28

Πίνακας 28: Αέριες εκπομπές 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO για το 2<sup>ο</sup> σενάριο ταχυτήτων**Αέριες εκπομπές Στόλος 1 με καύσιμο LNG - Σενάριο 2 [tn]**

Name	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5
CO <sub>2</sub>	2877.31	2938.94	2781.70	2107.97	1754.07
NO <sub>x</sub>	8.19	8.37	7.92	6.00	4.99
SO <sub>x</sub>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01
PM	0.19	0.19	0.18	0.14	0.11
CO	8.19	8.37	7.92	6.00	4.99
CH <sub>4</sub>	53.57	54.72	51.79	39.25	32.66
N <sub>2</sub> O	0.12	0.12	0.11	0.08	0.07
NMVOC	3.15	3.22	3.04	2.31	1.92

Πίνακας 29: Αέριες εκπομπές 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG για το 2<sup>ο</sup> σενάριο ταχυτήτων**Αέριες εκπομπές Στόλος 2 με καύσιμο HFO - Σενάριο 2 [tn]**

Name	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10
CO <sub>2</sub>	3517.10	3517.10	3270.60	3255.83	3223.26
NO <sub>x</sub>	88.62	88.62	82.41	82.03	81.21
SO <sub>x</sub>	55.43	55.43	51.55	51.32	50.80
PM	7.89	7.89	7.34	7.31	7.24
CO	3.13	3.13	2.91	2.90	2.87
CH <sub>4</sub>	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06
N <sub>2</sub> O	0.18	0.18	0.17	0.17	0.17
NMVOC	3.48	3.48	3.23	3.22	3.19

Πίνακας 30: Αέριες εκπομπές 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO για το 2<sup>ο</sup> σενάριο ταχυτήτων**Αέριες εκπομπές Στόλος 2 με καύσιμο MDO - Σενάριο 2 [tn]**

Name	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10
CO <sub>2</sub>	3621.01	3621.01	3367.23	3352.02	3318.49
NO <sub>x</sub>	83.30	83.30	77.46	77.11	76.34
SO <sub>x</sub>	2.98	2.98	2.77	2.76	2.73
PM	1.15	1.15	1.07	1.07	1.06
CO	3.13	3.13	2.91	2.90	2.87
CH <sub>4</sub>	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06
N <sub>2</sub> O	0.17	0.17	0.16	0.16	0.16
NMVOC	3.48	3.48	3.23	3.22	3.19

Πίνακας 31: Αέριες εκπομπές 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO για το 2<sup>ο</sup> σενάριο ταχυτήτων**Αέριες εκπομπές Στόλος 2 με καύσιμο LNG - Σενάριο 2 [tn]**

Name	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10
CO <sub>2</sub>	2656.47	2656.47	2453.21	2438.21	2420.35
NO <sub>x</sub>	7.56	7.56	6.98	6.94	6.89

<b>SO<sub>x</sub></b>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
<b>PM</b>	0.17	0.17	0.16	0.16	0.16
<b>CO</b>	7.56	7.56	6.98	6.94	6.89
<b>CH<sub>4</sub></b>	49.46	49.46	45.67	45.40	45.06
<b>N<sub>2</sub>O</b>	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10
<b>NMVOC</b>	2.91	2.91	2.69	2.67	2.65

Πίνακας 32: Αέριες εκπομπές 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG για το 2<sup>ο</sup> σενάριο ταχυτήτων

## 8.2 Σενάριο λειτουργίας

Για τη λειτουργία των στόλων επιλέχθηκε η μεταφορά 6500000 t κάρβουνου από την Αυστραλία στην Κίνα και συγκεκριμένα εκτελείται δρομολόγιο 3619 nm μεταξύ των λιμένων Port Hedland-Qingdao. Γίνεται η παραδοχή ότι στο δρομολόγιο Port Hedland-Qingdao τα πλοία βρίσκονται σε κατάσταση πλήρους φορτίου, ενώ κατά την επιστροφή τους στο λιμάνι Port Hedland βρίσκονται σε κατάσταση ερματισμού. Για την συγκεκριμένη διαδρομή επιλέχθηκαν δύο σενάρια λειτουργίας: στο πρώτο όλα τα πλοία των δύο στόλων κινούνται με ταχύτητα 11.5 kn, η οποία είναι η μέση τιμή των ταχυτήτων για την συγκεκριμένη διαδρομή, σύμφωνα με στοιχεία που συλλέχθηκαν από την ιστοσελίδα «www.marinetraffic.com». Στο δεύτερο σενάριο τα πλοία κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 33.

Όνομα πλοίου	Ταχύτητα [kn]
Πλοίο 1	11.7
Πλοίο 2	13.1
Πλοίο 3	12.2
Πλοίο 4	12.7
Πλοίο 5	11.8
Πλοίο 6	11.6
Πλοίο 7	11.6
Πλοίο 8	12.9
Πλοίο 9	13.2
Πλοίο 10	12.6

Πίνακας 33: Ταχύτητα λειτουργίας για το 2<sup>ο</sup> σενάριο λειτουργίας

Σημειώνεται ότι οι ταχύτητες αυτές δεν επιλέχθηκαν αυθαίρετα, αλλά ύστερα από μελέτη, έτσι ώστε τα πλοία να ικανοποιούν οριακά τον κανονισμό των εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά τονομίλι.

## 8.3 Σενάριο ανάλυσης κόστους λειτουργίας

Για τον υπολογισμό του κόστους λειτουργίας, που στην παρούσα εργασία αντιστοιχεί στο κόστος κατανάλωσης καυσίμου, επιλέχθηκαν οι τιμές των καυσίμων από την ιστοσελίδα «<https://shipandbunker.com/prices/apac>» για τα αντίστοιχα λιμάνια. Εξαιτίας της έλλειψης των τιμών καυσίμων για το λιμάνι του Port Hedland, χρησιμοποιήθηκαν οι αντίστοιχες τιμές από το λιμάνι του Sydney, αφού θεωρήθηκε ότι δεν θα υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις τιμές, επειδή είναι κοντινός λιμένας. Στον Πίνακα 34 αναγράφονται οι τιμές ανά τόνο καυσίμου (τιμές Ιανουαρίου 2018).

#### Τιμή καυσίμων [EUROS/tn]

Type	HFO	MDO	LNG
Sydney	397.36	560.17	504.82
Qingdao	334.09	544.05	424.05

Πίνακας 34: Τιμή καυσίμων (Ιανουαρίου 2018) «<https://shipandbunker.com/prices/apac>»

Όσον αφορά την ειδική κατανάλωση καυσίμου των βοηθητικών μηχανών λαμβάνεται από βιβλιογραφικές αναφορές ίση με  $0.200 \text{ kg/kWh}$  (Andersen, 2012).

## 8.4 Σενάριο ανάλυσης εξωτερικού κόστους

Για τον υπολογισμό του εξωτερικού κόστους επιλέχθηκε ως περιοχή λειτουργίας ο Βόρειο-Δυτικός Ατλαντικός Ωκεανός, της οποίας το εξωτερικό κόστος ανά τόνο αέριων εκπομπών παρουσιάζεται στον Πίνακα 35. Η θεώρηση αυτή έγινε εξαιτίας της έλλειψης των αντίστοιχων στοιχείων για την πραγματική περιοχή λειτουργίας (Αυστραλία- Κίνα).

#### Εξωτερικό κόστος για τον Βόρειο-Δυτικό Ατλαντικό Ωκεανό [EUROS/tn]

NO <sub>x</sub>	2250
SO <sub>2</sub>	2900
PM	5550
NMVOC	700

Πίνακας 35: Εξωτερικό κόστος για τον Βόρειο-Δυτικό Ατλαντικό Ωκεανό (Ricardo-AEA, 2014)

Ως τιμή του εξωτερικού κόστους ανά τόνο εκπομπής αέριων θερμοκηπίου επιλέχθηκε η μεσαία τιμή, η οποία είναι ίση με  $38 \text{ EUROS/tn CO}_2\text{e}$  (CE Delft, 2011).

## 9. Αποτελέσματα

---

Όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 8, η παρούσα εργασία εστιάζει στην αγορά μεταξύ Αυστραλίας και Κίνας και πιο συγκεκριμένα στη μεταφορά 6500000 t κάρβουνου από το λιμάνι Port Hedland (Αυστραλία) στο λιμάνι Qingdao (Κίνα). Η απόσταση αντιστοιχεί σε 3619 nm. Για το συγκεκριμένο ταξίδι επιλέχθηκαν δύο στόλοι Bulk Carriers και τρία διαφορετικά καύσιμα (HFO, MDO, LNG). Τέλος, εξετάστηκαν δύο σενάρια για κάθε ένα από τα παραπάνω σύνολα: στο πρώτο όλα τα πλοία κινούνται με ίδια ταχύτητα, ενώ στο δεύτερο κάθε πλοίο έχει διαφορετική ταχύτητα.

### 9.1 Σενάριο 1 – Ίδια ταχύτητα για όλα τα πλοία

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τους βέλτιστους συνδυασμούς πλοίων τόσο για τον πρώτο όσο και για τον δεύτερο στόλο. Στο πρώτο σενάριο λειτουργίας όλα τα πλοία κινούνται με την ίδια ταχύτητα ενώ εξετάζονται και τα τρία καύσιμα.

Για κάθε καύσιμο που χρησιμοποιείται οι Πίνακας 36, Πίνακας 37, Πίνακας 44, Πίνακας 45, Πίνακας 52 και Πίνακας 53 αφορούν στα γενικά δεδομένα, όπως αυτά προέκυψαν από το υπολογιστικό πρόγραμμα, για τον Στόλο 1 και τον Στόλο 2 αντίστοιχα. Οι Πίνακας 38, Πίνακας 46 και Πίνακας 51 αφορούν στα συνολικά δεδομένα των δύο στόλων για τη σύγκρισή τους. Κάθε ένας από τους παραπάνω πίνακες συνοδεύεται από το αντίστοιχο διάγραμμα, το οποίο διευκολύνει τη σύγκριση τόσο σε επίπεδο πλοίων, όπου παρουσιάζεται το ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου στο αντίστοιχο μέγεθος, όσο και σε επίπεδο στόλων.

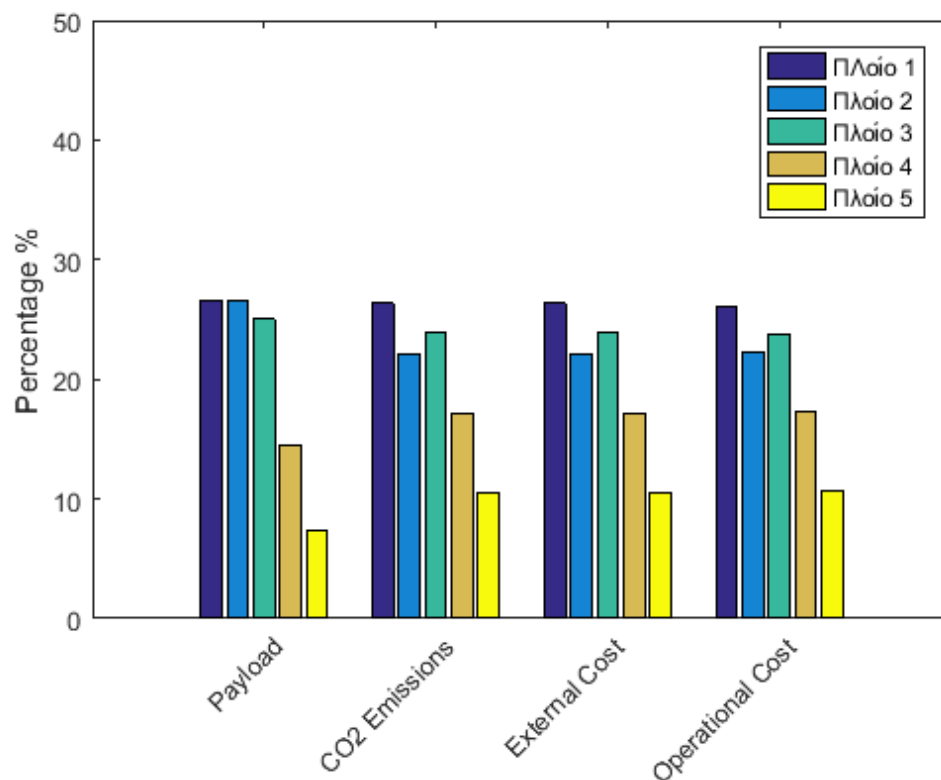
Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα δεδομένα όπως αυτά προέκυψαν από το υπολογιστικό πρόγραμμα, τα οποία απαιτούνται από τον κανονισμό MRV. Οι Πίνακας 39, Πίνακας 40, Πίνακας 47, Πίνακας 48, Πίνακας 55 και Πίνακας 56 αφορούν στα δεδομένα ανά διαδρομή κάθε πλοίου για τον Στόλο 1 και τον Στόλο 2 αντίστοιχα. Οι Πίνακας 41, Πίνακας 42, Πίνακας 49, Πίνακας 50, Πίνακας 57 και Πίνακας 58 αφορούν στα δεδομένα ανά έτος λειτουργίας κάθε πλοίου για τον Στόλο 1 και τον Στόλο 2 αντίστοιχα, ενώ οι Πίνακας 43, Πίνακας 51 και Πίνακας 59 αφορούν στα συνολικά δεδομένα για ένα έτος λειτουργίας των δύο στόλων.



## 9.1.1 Καύσιμο ΗΦΟ

## Γενικά δεδομένα - Στόλος 1

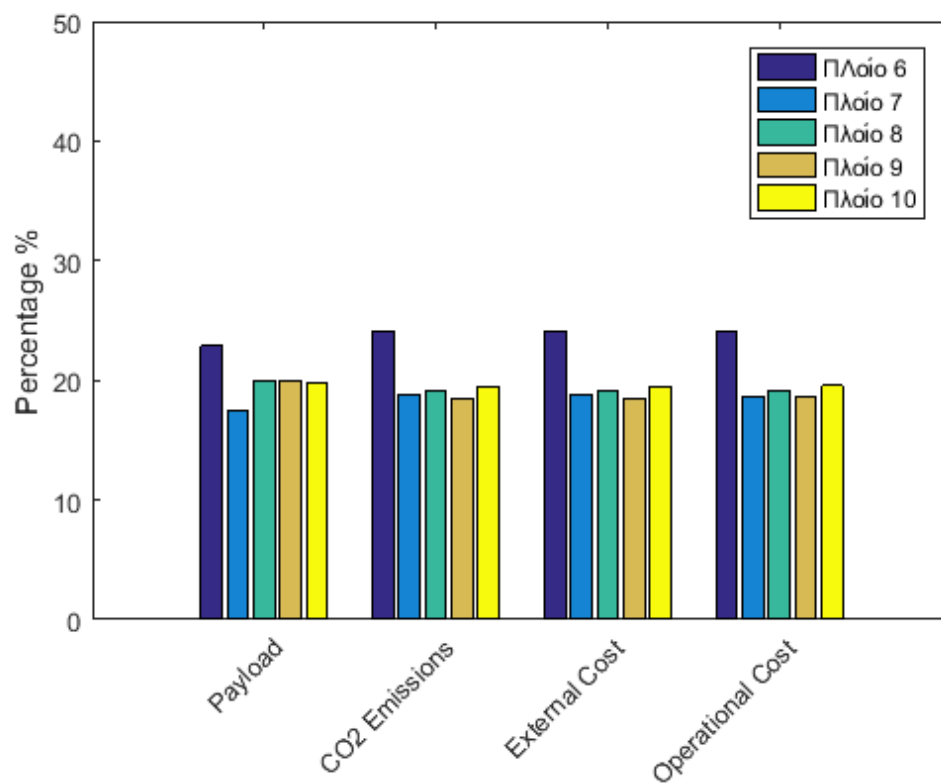
Πλοίο	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5	
Ταξίδια	9	9	9	9	6	-
Φορτίο	1728369	1726020	1626948	944604	474059	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	33382	28094	30242	21715	13323	tn
Εξωτερικό κόστος	5145841	4330802	4661204	3347184	2053391	EUROS
Κόστος λειτουργίας	4255029	3633395	3876316	2813122	1737293	EUROS

Πίνακας 36: Γενικά δεδομένα βέλτιστου συνδυασμού 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο ΗΦΟ 1<sup>ο</sup> σενάριοΔιάγραμμα 15: Ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου του 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο ΗΦΟ 1<sup>ο</sup> σενάριο

## Γενικά δεδομένα - Στόλος 2

Πλοίο	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10	
Ταξίδια	9	7	9	9	9	-
Φορτίο	1487394	1134182	1299411	1298250	1280763	<i>tn</i>
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	31211	24275	24692	23826	25181	<i>tn</i>
Εξωτερικό κόστος	4811253	3742085	3806222	3673130	3881127	<i>EUROS</i>
Κόστος λειτουργίας	3986946	3100958	3187900	3086029	3244882	<i>EUROS</i>

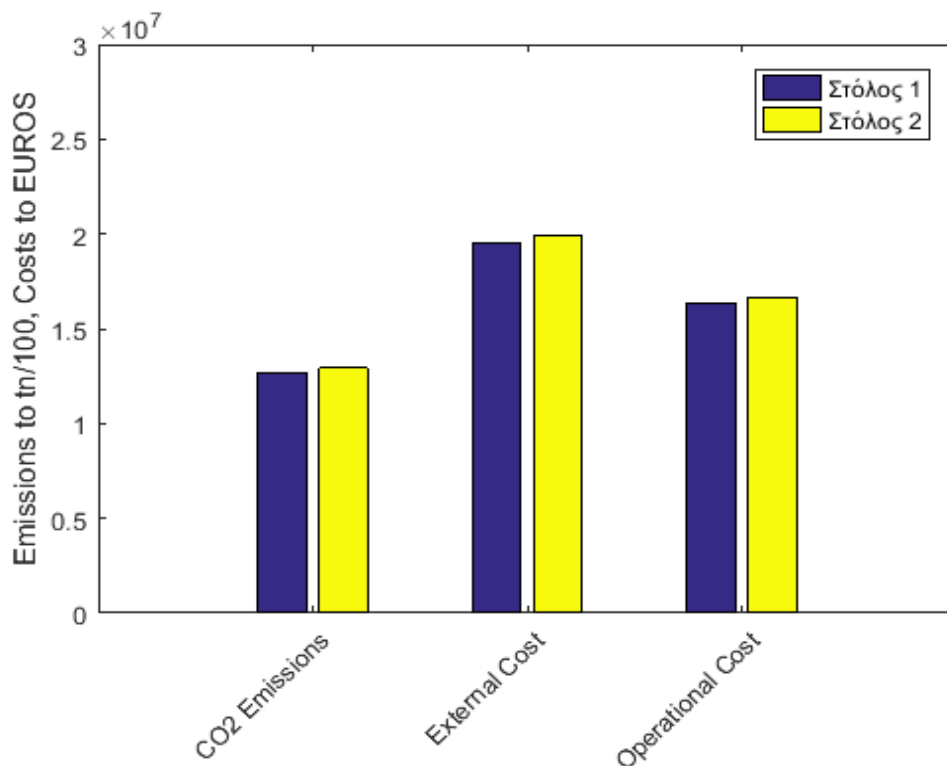
Πίνακας 37: Γενικά δεδομένα βέλτιστου συνδυασμού 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 1<sup>ο</sup> σενάριο



Διάγραμμα 16: Ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου του 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 1<sup>ο</sup> σενάριο

Στόλος	Συνολικά δεδομένα		
	Στόλος 1	Στόλος 2	
Ταξίδια	42	43	-
Φορτίο	6500000	6500000	<i>tn</i>
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	126756	129186	<i>tn</i>
Εξωτερικό κόστος	19538423	19913816	<i>EUROS</i>
Κόστος λειτουργίας	16315154	16606715	<i>EUROS</i>

Πίνακας 38: Συνολικά δεδομένα 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 1<sup>ο</sup> σενάριο



Διάγραμμα 17: Σύγκριση 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 1<sup>ο</sup> σενάριο

Στο παραπάνω διάγραμμα σημειώνεται ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι πολλαπλασιασμένες με 10<sup>2</sup>, ώστε να καταστεί εφικτή η σύγκρισή τους χρησιμοποιώντας τον ίδιο άξονα αναφοράς.

#### Δεδομένα ανά διαδρομή - Στόλος 1

Πλοίο	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5	
Κατανάλωση καυσίμου	497.47	403.07	444.28	310.12	280.39	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	1854.54	1560.80	1680.13	1206.38	1110.29	tn
Διανυθείσα απόσταση	3619	3619	3619	3619	3619	nm
Χρόνος εν πλώ	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1	days
Φορτίο	192041	191780	180772	104956	79010	tn
Μεταφορικό έργο	6.95 · 10 <sup>8</sup>	6.94 · 10 <sup>8</sup>	6.54 · 10 <sup>8</sup>	3.80 · 10 <sup>8</sup>	2.86 · 10 <sup>8</sup>	tn · nm

Πίνακας 39: Δεδομένα ανά διαδρομή 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 1<sup>ο</sup> σενάριο

### Δεδομένα ανά διαδρομή - Στόλος 2

Πλοίο	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10	
Κατανάλωση καυσίμου	462.54	462.54	355.92	340.46	364.75	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	1733.95	1733.95	1371.81	1323.68	1398.92	tn
Διανυθείσα απόσταση	3619	3619	3619	3619	3619	nm
Χρόνος εν πλώ	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1	days
Φορτίο	165266	162026	144379	144250	142307	tn
Μεταφορικό έργο	$5.98 \cdot 10^8$	$5.86 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	$5.22 \cdot 10^8$	$5.15 \cdot 10^8$	tn · nm

Πίνακας 40: Δεδομένα ανά διαδρομή 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 1<sup>ο</sup> σενάριο

### Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας - Στόλος 1

Πλοίο	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5	
Κατανάλωση καυσίμου	8954	7255	7997	5582	3365	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	33382	28094	30242	21715	13323	tn
Διανυθείσα απόσταση	65142	65142	65142	65142	43428	tn
Χρόνος εν πλώ	236	236	236	236	157	nm
Φορτίο	$1.73 \cdot 10^6$	$1.73 \cdot 10^6$	$1.63 \cdot 10^6$	$9.45 \cdot 10^5$	$4.74 \cdot 10^5$	days
Μεταφορικό έργο	$1.13 \cdot 10^{11}$	$1.12 \cdot 10^{11}$	$1.06 \cdot 10^{11}$	$6.15 \cdot 10^{10}$	$2.06 \cdot 10^{10}$	tn
Κατανάλωση καυσίμου	0.137	0.111	0.123	0.086	0.077	$\frac{tn}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση	7.95	6.45	7.55	9.07	1.63	tn
Κατανάλωση καυσίμου	$\cdot 10^{-8}$	$\cdot 10^{-8}$	$\cdot 10^{-8}$	$\cdot 10^{-8}$	$\cdot 10^{-7}$	$\frac{tn \cdot nm}{gr}$
Μεταφορικό έργο	512445	431278	464251	333345	306793	$\frac{gr}{nm}$
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	0.296	0.250	0.285	0.353	0.647	$\frac{gr}{tn \cdot nm}$
Διανυθείσα απόσταση						
Εκπομπές CO <sub>2</sub>						
Μεταφορικό έργο						

Πίνακας 41: Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 1<sup>ο</sup> σενάριο

### Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας - Στόλος 2

Πλοίο	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10	
Κατανάλωση καυσίμου	8326	6476	6407	6128	6566	<i>tn</i>
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	31211	24275	24692	23826	25181	<i>tn</i>
Διανυθείσα απόσταση	65142	50666	65142	65142	65142	<i>tn</i>
Χρόνος εν πλώ	236	184	236	236	236	<i>nm</i>
Φορτίο	1.49 · 10 <sup>6</sup>	1.13 · 10 <sup>6</sup>	1.30 · 10 <sup>6</sup>	1.30 · 10 <sup>6</sup>	1.28 · 10 <sup>6</sup>	<i>days</i>
Μεταφορικό έργο	9.96 · 10 <sup>10</sup>	5.75 · 10 <sup>10</sup>	8.46 · 10 <sup>10</sup>	8.46 · 10 <sup>10</sup>	8.34 · 10 <sup>10</sup>	<i>tn</i>
Κατανάλωση καυσίμου	0.128	0.128	0.098	0.094	0.101	$\frac{tn}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση						<i>nm</i>
Κατανάλωση καυσίμου	8.59 · 10 <sup>-8</sup>	1.13 · 10 <sup>-7</sup>	7.57 · 10 <sup>-8</sup>	7.25 · 10 <sup>-8</sup>	7.87 · 10 <sup>-8</sup>	$\frac{tn}{nm}$
Μεταφορικό έργο						<i>tn · nm</i>
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	479123	479123	379056	365758	386549	$\frac{gr}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση						<i>nm</i>
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	0.322	0.422	0.292	0.282	0.302	$\frac{gr}{tn · nm}$
Μεταφορικό έργο						<i>tn · nm</i>

Πίνακας 42: Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 1<sup>ο</sup> σενάριο

### Συνολικά δεδομένα για ένα έτος λειτουργία

Στόλος	Στόλος 1	Στόλος 2	
Κατανάλωση καυσίμου	33154	33902	<i>tn</i>
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	126756	129186	<i>tn</i>
Διανυθείσα απόσταση	303996	311234	<i>nm</i>
Χρόνος εν πλώ	1101	1128	<i>days</i>
Μεταφερόμενο φορτίο	6500000	6500000	<i>tn</i>
Μεταφορικό έργο	4.13 · 10 <sup>11</sup>	4.07 · 10 <sup>11</sup>	<i>tn · nm</i>
Κατανάλωση καυσίμου	0.109	0.109	$\frac{tn}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση			<i>nm</i>
Κατανάλωση καυσίμου	8.03 · 10 <sup>-8</sup>	8.33 · 10 <sup>-8</sup>	$\frac{tn}{nm}$
Μεταφορικό έργο			<i>tn · nm</i>
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	416967	415075	$\frac{gr}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση			<i>nm</i>

**Εκπομπές CO<sub>2</sub>**  
**Μεταφορικό έργο**

0.307

0.317

$$\frac{gr}{tn \cdot nm}$$

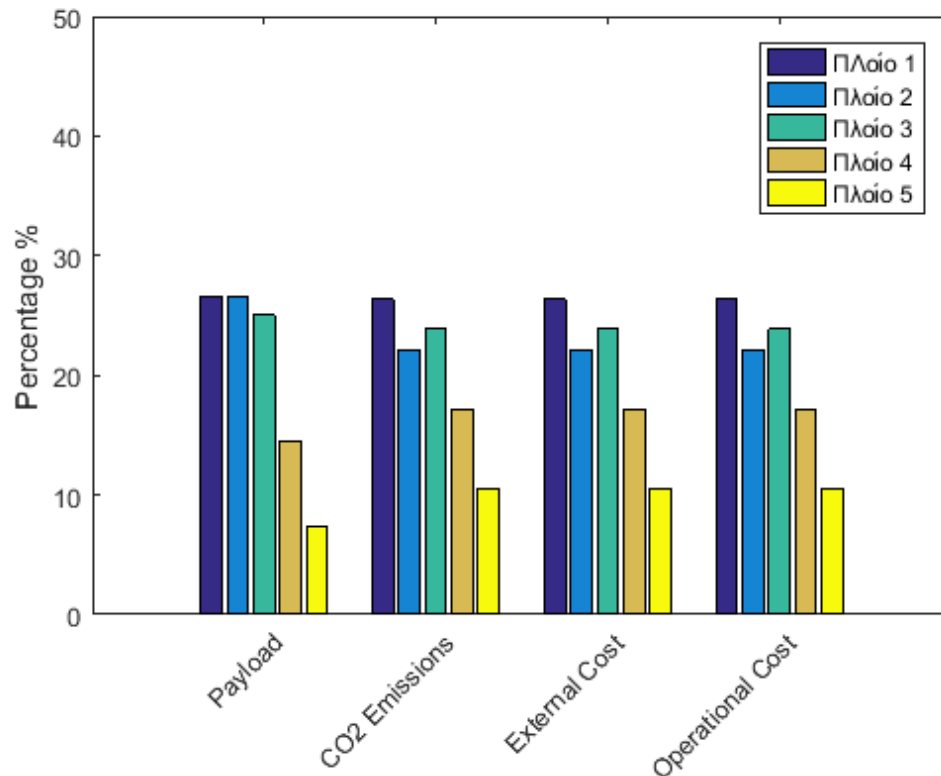
Πίνακας 43: Συνολικά δεδομένα για ένα έτος λειτουργίας 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> με καύσιμο ΗΦΟ 1<sup>ο</sup> σενάριο

### 9.1.2 Καύσιμο MDO

#### Γενικά δεδομένα - Στόλος 1

Πλοίο	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5	
Ταξίδια	9	9	9	9	6	-
Φορτίο	1728369	1726020	1626948	944604	474059	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	34368	28924	31136	22356	13717	tn
Εξωτερικό κόστος	3269200	2751590	2961720	2127303	1305177	EUROS
Κόστος λειτουργίας	5923995	4985666	5366855	3853566	2364421	EUROS

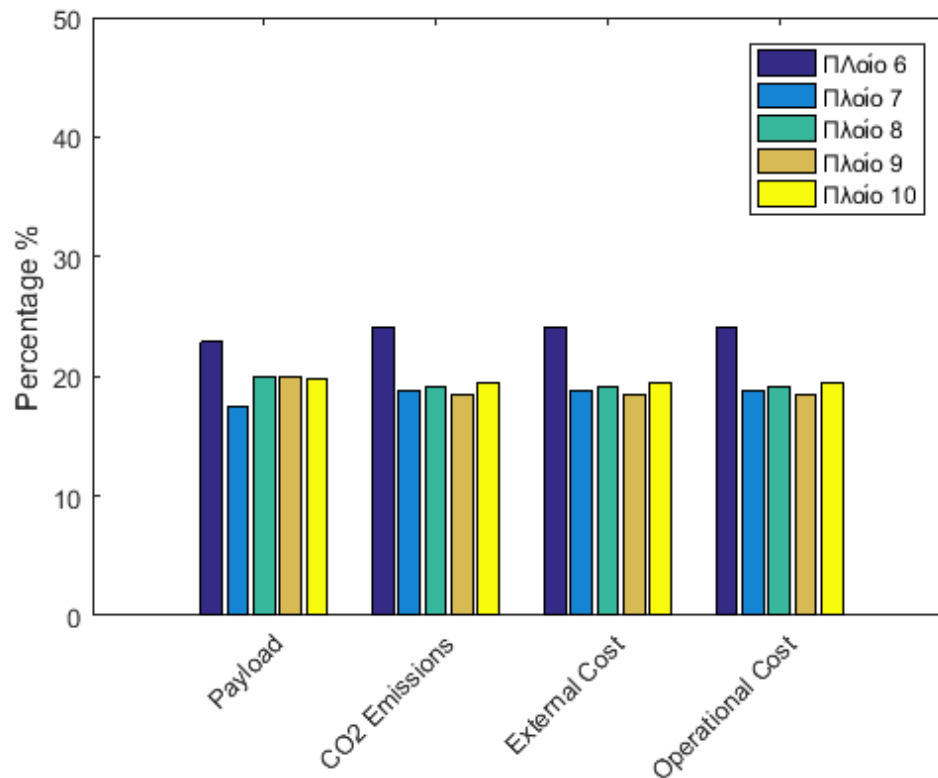
Πίνακας 44: Γενικά δεδομένα βέλτιστου συνδυασμού 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 1<sup>ο</sup> σενάριο



Διάγραμμα 18: Ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου του 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 1<sup>ο</sup> σενάριο

## Γενικά δεδομένα - Στόλος 2

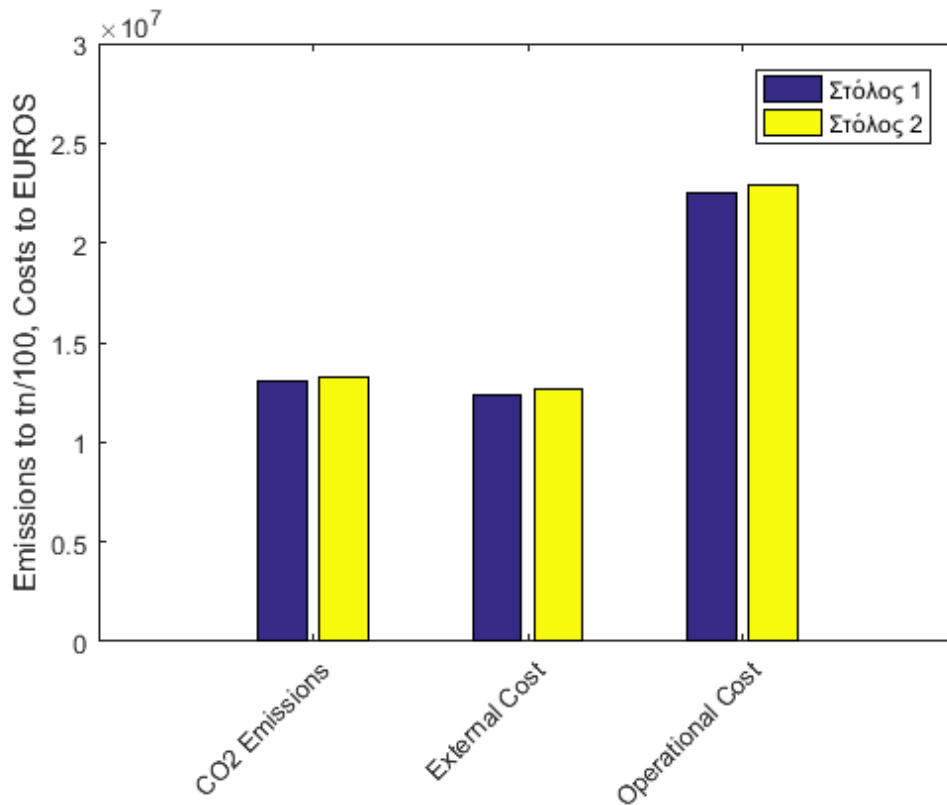
Πλοίο	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10	
Ταξίδια	9	7	9	9	9	-
Φορτίο	1487394	1134182	1299411	1298250	1280763	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	32133	24992	25422	24530	25925	tn
Εξωτερικό κόστος	3057389	2377969	2418400	2333923	2465835	EUROS
Κόστος λειτουργίας	5538732	4307903	4381995	4228256	4468600	EUROS

Πίνακας 45: Γενικά δεδομένα βέλτιστου συνδυασμού 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 1<sup>ο</sup> σενάριοΔιάγραμμα 19: Ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου του 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 1<sup>ο</sup> σενάριο

## Συνολικά δεδομένα

Στόλος	Στόλος 1	Στόλος 2	
Ταξίδια	42	43	-
Φορτίο	6500000	6500000	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	130501	133002	tn
Εξωτερικό κόστος	12414990	12653515	EUROS
Κόστος λειτουργίας	22494502	22925486	EUROS

Πίνακας 46: Συνολικά δεδομένα 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 1<sup>ο</sup> σενάριο



Διάγραμμα 20: Σύγκριση 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 1<sup>ο</sup> σενάριο

Στο παραπάνω διάγραμμα σημειώνεται ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι πολλαπλασιασμένες με  $10^2$ , ώστε να καταστεί εφικτή η σύγκρισή τους χρησιμοποιώντας τον ίδιο άξονα αναφοράς.

#### Δεδομένα ανά διαδρομή - Στόλος 1

Πλοίο	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5	
Κατανάλωση καυσίμου	497.47	403.07	444.28	310.12	280.39	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	1909.33	1606.91	1729.77	1242.02	1143.09	tn
Διανυθείσα απόσταση	3619	3619	3619	3619	3619	nm
Χρόνος εν πλώ	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1	days
Φορτίο	192041	191780	180772	104956	79010	tn
Μεταφορικό έργο	$6.95 \cdot 10^8$	$6.94 \cdot 10^8$	$6.54 \cdot 10^8$	$3.80 \cdot 10^8$	$2.86 \cdot 10^8$	tn · nm

Πίνακας 47: Δεδομένα ανά διαδρομή 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 1<sup>ο</sup> σενάριο



### Δεδομένα ανά διαδρομή - Στόλος 2

Πλοίο	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10	
Κατανάλωση καυσίμου	462.54	462.54	355.92	340.46	364.75	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	1785.16	1785.16	1412.34	1362.79	1440.25	tn
Διανυθείσα απόσταση	3619	3619	3619	3619	3619	nm
Χρόνος εν πλώ	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1	days
Φορτίο	165266	162026	144379	144250	142307	tn
Μεταφορικό έργο	$5.98 \cdot 10^8$	$5.86 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	$5.22 \cdot 10^8$	$5.15 \cdot 10^8$	tn · nm

Πίνακας 48: Δεδομένα ανά διαδρομή 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 1<sup>ο</sup> σενάριο

### Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας - Στόλος 1

Πλοίο	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5	
Κατανάλωση καυσίμου	8954	7255	7997	5582	3365	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	34368	28924	31136	22356	13717	tn
Διανυθείσα απόσταση	65142	65142	65142	65142	43428	tn
Χρόνος εν πλώ	236	236	236	236	157	nm
Φορτίο	$1.73 \cdot 10^6$	$1.73 \cdot 10^6$	$1.63 \cdot 10^6$	$9.45 \cdot 10^5$	$4.74 \cdot 10^5$	days
Μεταφορικό έργο	$1.13 \cdot 10^{11}$	$1.12 \cdot 10^{11}$	$1.06 \cdot 10^{11}$	$6.15 \cdot 10^{10}$	$2.06 \cdot 10^{10}$	tn
Κατανάλωση καυσίμου	0.137	0.111	0.123	0.086	0.077	$\frac{tn}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση						nm
Κατανάλωση καυσίμου	7.95	6.45	7.55	9.07	1.63	tn
Μεταφορικό έργο	$\cdot 10^{-8}$	$\cdot 10^{-8}$	$\cdot 10^{-8}$	$\cdot 10^{-8}$	$\cdot 10^{-7}$	$\frac{tn \cdot nm}{gr}$
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	527585	444020	477968	343193	315858	$\frac{gr}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση						nm
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	0.305	0.257	0.294	0.363	0.666	$\frac{gr}{tn \cdot nm}$
Μεταφορικό έργο						$\frac{gr}{tn \cdot nm}$

Πίνακας 49: Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 1<sup>ο</sup> σενάριο

### Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας - Στόλος 2

Πλοίο	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10	
Κατανάλωση καυσίμου	8326	6476	6407	6128	6566	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	32133	24992	25422	24530	25925	tn
Διανυθείσα απόσταση	65142	50666	65142	65142	65142	tn
Χρόνος εν πλώ	236	184	236	236	236	nm
Φορτίο	1.49 · 10 <sup>6</sup>	1.13 · 10 <sup>6</sup>	1.30 · 10 <sup>6</sup>	1.30 · 10 <sup>6</sup>	1.28 · 10 <sup>6</sup>	days
Μεταφορικό έργο	9.96 · 10 <sup>10</sup>	5.75 · 10 <sup>10</sup>	8.46 · 10 <sup>10</sup>	8.46 · 10 <sup>10</sup>	8.34 · 10 <sup>10</sup>	tn
Κατανάλωση καυσίμου	0.128	0.128	0.098	0.094	0.101	$\frac{tn}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση						nm
Κατανάλωση καυσίμου	8.59 · 10 <sup>-8</sup>	1.13 · 10 <sup>-7</sup>	7.57 · 10 <sup>-8</sup>	7.25 · 10 <sup>-8</sup>	7.87 · 10 <sup>-8</sup>	$\frac{tn}{nm}$
Μεταφορικό έργο						tn · nm
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	493273	493273	390256	376564	397969	$\frac{gr}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση						nm
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	0.332	0.435	0.300	0.290	0.311	$\frac{gr}{tn \cdot nm}$
Μεταφορικό έργο						tn · nm

Πίνακας 50: Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 1<sup>ο</sup> σενάριο

### Συνολικά δεδομένα για ένα έτος λειτουργία

Στόλος	Στόλος 1	Στόλος 2	
Κατανάλωση καυσίμου	33154	33902	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	130501	133002	tn
Διανυθείσα απόσταση	303996	311234	nm
Χρόνος εν πλώ	1101	1128	days
Μεταφερόμενο φορτίο	6500000	6500000	tn
Μεταφορικό έργο	4.13 · 10 <sup>11</sup>	4.07 · 10 <sup>11</sup>	tn · nm
Κατανάλωση καυσίμου	0.109	0.109	$\frac{tn}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση			nm
Κατανάλωση καυσίμου	8.03 · 10 <sup>-8</sup>	8.33 · 10 <sup>-8</sup>	$\frac{tn}{nm}$
Μεταφορικό έργο			tn · nm
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	429287	427336	$\frac{gr}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση			nm

<b>Εκπομπές CO<sub>2</sub></b> <b>Μεταφορικό έργο</b>	0.316	0.327	$\frac{gr}{tn \cdot nm}$
--	-------	-------	--------------------------

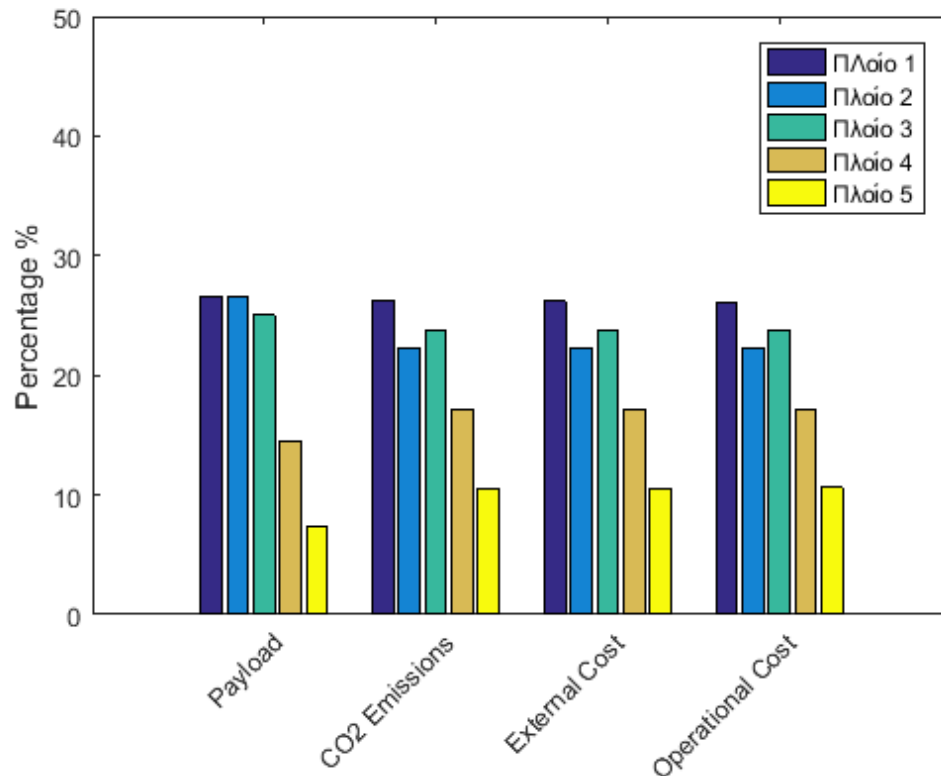
Πίνακας 51: Συνολικά δεδομένα για ένα έτος λειτουργίας 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> με καύσιμο MDO 1<sup>ο</sup> σενάριο

### 9.1.3 Καύσιμο LNG

#### Γενικά δεδομένα - Στόλος 1

Πλοίο	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5	
Ταξίδια	9	9	9	9	6	-
Φορτίο	1728369	1726020	1626948	944604	474059	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	25208	21390	22892	16470	10154	tn
Εξωτερικό κόστος	1605227	1363330	1458144	1048650	1605227	EUROS
Κόστος λειτουργίας	4416742	3771347	4020740	2906629	1796861	EUROS

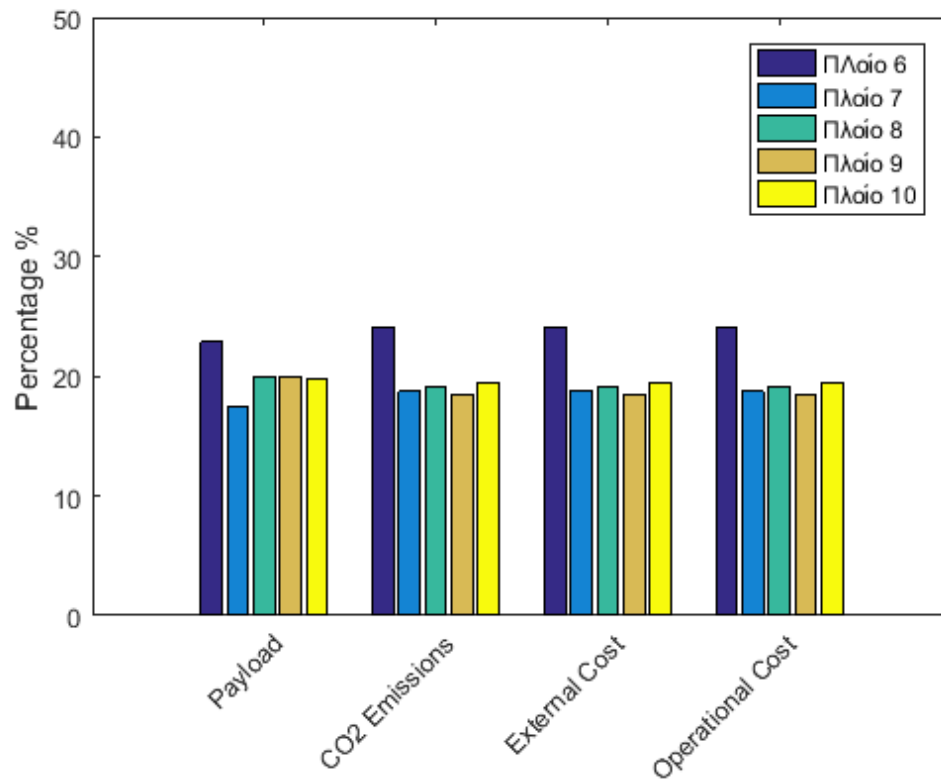
Πίνακας 52: Γενικά δεδομένα βέλτιστου συνδυασμού 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 1<sup>ο</sup> σενάριο



Διάγραμμα 21: Ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου του 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 1<sup>ο</sup> σενάριο

## Γενικά δεδομένα - Στόλος 2

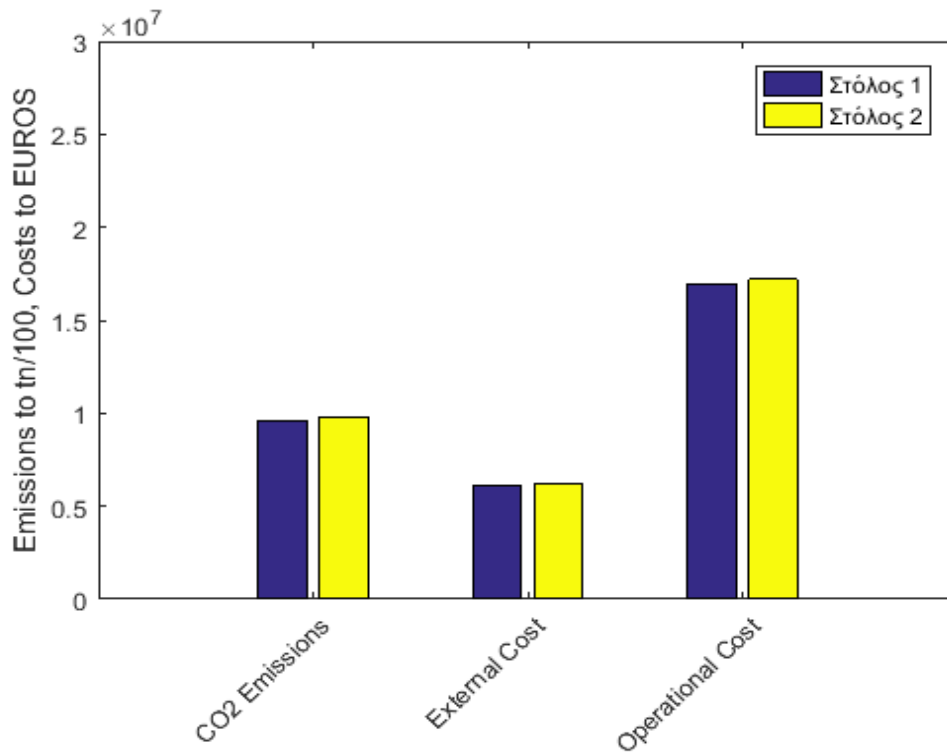
Πλοίο	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10	
Ταξίδια	9	7	9	9	9	-
Φορτίο	1487394	1134182	1299411	1298250	1280763	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	23590	18348	18700	18052	19054	tn
Εξωτερικό κόστος	1502021	1168239	1191164	1149639	1213481	EUROS
Κόστος λειτουργίας	4137305	3217904	3295217	3185712	3354860	EUROS

Πίνακας 53: Γενικά δεδομένα βέλτιστου συνδυασμού 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 1<sup>ο</sup> σενάριοΔιάγραμμα 22: Ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου του 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 1<sup>ο</sup> σενάριο

## Συνολικά δεδομένα

Στόλος	Στόλος 1	Στόλος 2	
Ταξίδια	42	43	-
Φορτίο	6500000	6500000	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	96113	97744	tn
Εξωτερικό κόστος	6122231	6224544	EUROS
Κόστος λειτουργίας	16912319	17190998	EUROS

Πίνακας 54: Συνολικά δεδομένα 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 1<sup>ο</sup> σενάριο



Διάγραμμα 23: Σύγκριση 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 1<sup>ο</sup> σενάριο

Στο παραπάνω διάγραμμα σημειώνεται ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι πολλαπλασιασμένες με  $10^2$ , ώστε να καταστεί εφικτή η σύγκρισή τους χρησιμοποιώντας τον ίδιο άξονα αναφοράς.

#### Δεδομένα ανά διαδρομή - Στόλος 1

Πλοίο	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5	
Κατανάλωση καυσίμου	411.08	333.90	367.13	255.40	231.49	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	1400.42	1188.33	1271.77	915.00	846.14	tn
Διανυθείσα απόσταση	3619	3619	3619	3619	3619	nm
Χρόνος εν πλώ	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1	days
Φορτίο	192041	191780	180772	104956	79010	tn
Μεταφορικό έργο	$6.95 \cdot 10^8$	$6.94 \cdot 10^8$	$6.54 \cdot 10^8$	$3.80 \cdot 10^8$	$2.86 \cdot 10^8$	tn · nm

Πίνακας 55: Δεδομένα ανά διαδρομή 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 1<sup>ο</sup> σενάριο

### Δεδομένα ανά διαδρομή - Στόλος 2

Πλοίο	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10	
Κατανάλωση καυσίμου	382.22	382.22	293.11	280.03	300.38	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	1310.57	1310.57	1038.89	1002.91	1058.55	tn
Διανυθείσα απόσταση	3619	3619	3619	3619	3619	nm
Χρόνος εν πλώ	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1	days
Φορτίο	165266	162026	144379	144250	142307	tn
Μεταφορικό έργο	$5.98 \cdot 10^8$	$5.86 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	$5.22 \cdot 10^8$	$5.15 \cdot 10^8$	tn · nm

Πίνακας 56: Δεδομένα ανά διαδρομή 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 1<sup>ο</sup> σενάριο

### Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας - Στόλος 1

Πλοίο	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5	
Κατανάλωση καυσίμου	7399	6010	6608	4597	2778	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	25208	21390	22892	16470	10154	tn
Διανυθείσα απόσταση	65142	65142	65142	65142	43428	tn
Χρόνος εν πλώ	236	236	236	236	157	nm
Φορτίο	$1.73 \cdot 10^6$	$1.73 \cdot 10^6$	$1.63 \cdot 10^6$	$9.45 \cdot 10^5$	$4.74 \cdot 10^5$	days
Μεταφορικό έργο	$1.13 \cdot 10^{11}$	$1.12 \cdot 10^{11}$	$1.06 \cdot 10^{11}$	$6.15 \cdot 10^{10}$	$2.06 \cdot 10^{10}$	tn
Κατανάλωση καυσίμου	0.114	0.092	0.101	0.071	0.064	$\frac{tn}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση						nm
Κατανάλωση καυσίμου	6.57	5.35	6.24	7.47	1.35	tn
Μεταφορικό έργο	$\cdot 10^{-8}$	$\cdot 10^{-8}$	$\cdot 10^{-8}$	$\cdot 10^{-8}$	$\cdot 10^{-7}$	$\frac{tn \cdot nm}{gr}$
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	386963	328357	351413	252832	233805	$\frac{gr}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση						nm
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	0.224	0.190	0.216	0.268	0.493	$\frac{gr}{tn \cdot nm}$
Μεταφορικό έργο						tn · nm

Πίνακας 57: Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 1<sup>ο</sup> σενάριο

### Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας - Στόλος 2

Πλοίο	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10	
Κατανάλωση καυσίμου	6880	5351	5276	5040	5407	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	23590	18348	18700	18052	19054	tn
Διανυθείσα απόσταση	65142	50666	65142	65142	65142	tn
Χρόνος εν πλώ	236	184	236	236	236	nm
Φορτίο	1.49 · 10 <sup>6</sup>	1.13 · 10 <sup>6</sup>	1.30 · 10 <sup>6</sup>	1.30 · 10 <sup>6</sup>	1.28 · 10 <sup>6</sup>	days
Μεταφορικό έργο	9.96 · 10 <sup>10</sup>	5.75 · 10 <sup>10</sup>	8.46 · 10 <sup>10</sup>	8.46 · 10 <sup>10</sup>	8.34 · 10 <sup>10</sup>	tn
Κατανάλωση καυσίμου	0.106	0.106	0.081	0.077	0.083	$\frac{tn}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση						nm
Κατανάλωση καυσίμου	7.10 · 10 <sup>-8</sup>	9.31 · 10 <sup>-8</sup>	6.23 · 10 <sup>-8</sup>	5.96 · 10 <sup>-8</sup>	6.48 · 10 <sup>-8</sup>	$\frac{tn}{nm}$
Μεταφορικό έργο						tn · nm
Εκπομπές CO <sub>2</sub>						$\frac{gr}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση	362136	362136	287065	277122	292498	$\frac{gr}{nm}$
Εκπομπές CO <sub>2</sub>						$\frac{gr}{nm}$
Μεταφορικό έργο	0.243	0.319	0.221	0.213	0.228	$\frac{gr}{tn \cdot nm}$

Πίνακας 58: Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 1<sup>ο</sup> σενάριο

### Συνολικά δεδομένα για ένα έτος λειτουργία

Στόλος	Στόλος 1	Στόλος 2	
Κατανάλωση καυσίμου	27393	27954	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	96113	97744	tn
Διανυθείσα απόσταση	303996	311234	nm
Χρόνος εν πλώ	1101	1128	days
Μεταφερόμενο φορτίο	6500000	6500000	tn
Μεταφορικό έργο	4.13 · 10 <sup>11</sup>	4.07 · 10 <sup>11</sup>	tn · nm
Κατανάλωση καυσίμου	0.090	0.090	$\frac{tn}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση			nm
Κατανάλωση καυσίμου	6.63 · 10 <sup>-8</sup>	6.87 · 10 <sup>-8</sup>	$\frac{tn}{nm}$
Μεταφορικό έργο			tn · nm
Εκπομπές CO <sub>2</sub>			$\frac{gr}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση	316165	314055	$\frac{gr}{nm}$

<b>Εκπομπές CO<sub>2</sub> Μεταφορικό έργο</b>	0.233	0.240	$\frac{gr}{tn \cdot nm}$
--	-------	-------	--------------------------

Πίνακας 59: Συνολικά δεδομένα για ένα έτος λειτουργίας 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> με καύσιμο LNG 1<sup>ο</sup> σενάριο

#### 9.1.4 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων και σύγκριση για τα τρία είδη καυσίμων

Παρατηρώντας τα Διάγραμμα 15, Διάγραμμα 18 και Διάγραμμα 21 που αφορούν στο ποσοστό συνεισφοράς μεταξύ των πλοίων του Στόλου 1 στη μεταφορά φορτίου, στις εκπομπές CO<sub>2</sub>, στο εξωτερικό κόστος και στο κόστος λειτουργίας, διαπιστώνεται ότι τα ποσοστά διαφέρουν για κάθε μέγεθος. Πιο συγκεκριμένα, το Πλοίο 2 έχει ποσοστό συνεισφοράς στο μεταφερόμενο φορτίο περίπου 26%, ενώ στα υπόλοιπα μεγέθη περίπου 22%, το οποίο το καθιστά πολύ πιο αποδοτικό σε σχέση με τα υπόλοιπα. Από την άλλη πλευρά τα Πλοία 4 και 5 παρατηρείται ότι έχουν μικρότερο ποσοστό συνεισφοράς στη μεταφορά φορτίου με ποσοστά 14.5 % και 7%, αντίστοιχα, σε σχέση με τα ποσοστά συνεισφοράς στα υπόλοιπα μεγέθη (περίπου 17% και 11%, αντίστοιχα). Δεδομένου ότι το πρόγραμμα κάνει βελτιστοποίηση των τριών κριτηρίων, τα παραπάνω αποτελούν τον λόγο που το υπολογιστικό πρόγραμμα επιλέγει να χρησιμοποιήσει τελευταία τα Πλοία 4 και Πλοία 5. Αυτό διαπιστώνεται και από το γεγονός ότι το Πλοίο 5 εκτελεί μόλις 6 ταξίδια.

Αντίστοιχα, για τον Στόλο2 από τα Διάγραμμα 16, Διάγραμμα 19 και Διάγραμμα 22 παρατηρείται ότι τα πλοία δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές στα ποσοστά συνεισφοράς στα υπό μελέτη μεγέθη, με εξαίρεση τα Πλοία 6 και 7. Τα πλοία αυτά ως αδερφά παρουσιάζουν κοντινά αποτελέσματα και χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα τελευταία, καθώς έχουν ποσοστό συνεισφοράς στη μεταφορά φορτίου 23% και 17% αντίστοιχα, ενώ τα ποσοστά συνεισφοράς τους στα υπόλοιπα μεγέθη ανέρχονται σε 25% και 19% αντίστοιχα.

Στον Πίνακας 60 παρουσιάζονται τα συνολικά δεδομένα των δύο στόλων για HFO και MDO για το πρώτο σενάριο ταχυτήτων, ενώ ακολουθεί και το αντίστοιχο διάγραμμα.

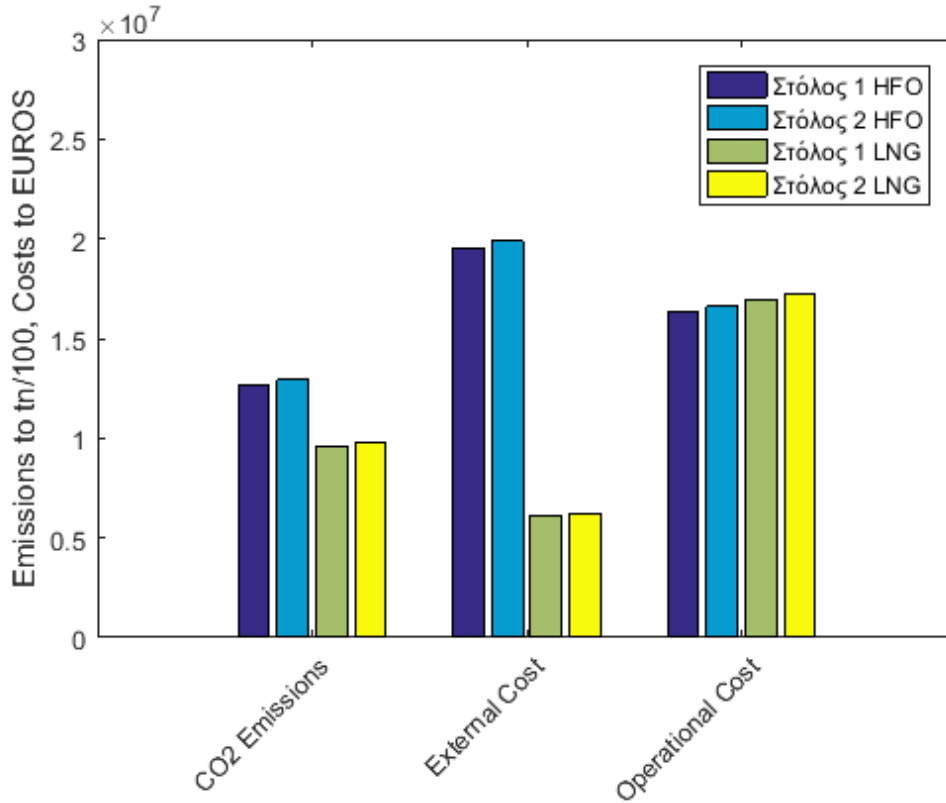
#### Συνολικά δεδομένα

Στόλος	Στόλος 1 HFO	Στόλος 2 HFO	Στόλος 1 LNG	Στόλος 2 LNG
<b>Εκπομπές CO<sub>2</sub> [tn]</b>	126756	129186	96113	97744
<b>Εξωτερικό κόστος [EUROS]</b>	19538423	19913816	6122231	6224544



<b>Κόστος λειτουργίας [EUROS]</b>	16315154	16606715	16912319	17190998
---	----------	----------	----------	----------

Πίνακας 60: Συνολικά δεδομένα για του 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> στόλου για HFO και MDO 1<sup>ο</sup> σενάριο



Διάγραμμα 24: Σύγκριση 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> στόλου για HFO και MDO 1<sup>ο</sup> σενάριο

Στο παραπάνω διάγραμμα σημειώνεται ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι πολλαπλασιασμένες με  $10^2$ , ώστε να καταστεί εφικτή η σύγκρισή τους χρησιμοποιώντας τον ίδιο άξονα αναφοράς.

Διαπιστώνουμε ότι ο Στόλος 1 παρουσιάζει τα βέλτιστα αποτελέσματα και στα τρία κριτήρια. Επιπλέον, το LNG είναι το βέλτιστο καύσιμο καθώς παρουσιάζει τις μικρότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και το μικρότερο εξωτερικό κόστος, ενώ όσον αφορά το κόστος λειτουργίας είναι το δεύτερο οικονομικότερο με μικρή διαφορά από το πρώτο που είναι το HFO. Το HFO παρουσιάζει μικρές εκπομπές CO<sub>2</sub> και μικρό κόστος λειτουργίας, όμως παρουσιάζει σχεδόν το τριπλάσιο εξωτερικό κόστος σε σχέση με το LNG. Σημειώνεται ότι το κόστος λειτουργίας των πλοίων είναι αρκετά μεγαλύτερο σε σχέση με τα άλλα δύο καύσιμα.

### 9.1.5 Ανάλυση των αποτελεσμάτων με βάση τους ισχύοντες κανονισμούς

Στη συνέχεια αναλύονται τα αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου με βάση τους ισχύοντες κανονισμούς που αφορούν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και οξειδίων του αζώτου, όπως περιγράφηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια.

Στους Πίνακες 61 και Πίνακας 62 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά τονομίλι (Δείκτης EEDI) και στους Πίνακες 63 και Πίνακας 64 οι εκπομπές NO<sub>x</sub> ανά κιλοβατώρα για κάθε πλοίο και για τα τρία καύσιμα λειτουργίας, αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν από το υπολογιστικό εργαλείο. Οι πίνακες συνοδεύονται από τα αντίστοιχα διαγράμματα.

**Δείκτης EEDI - Στόλος 1 [gr CO<sub>2</sub>/tn · nm]**

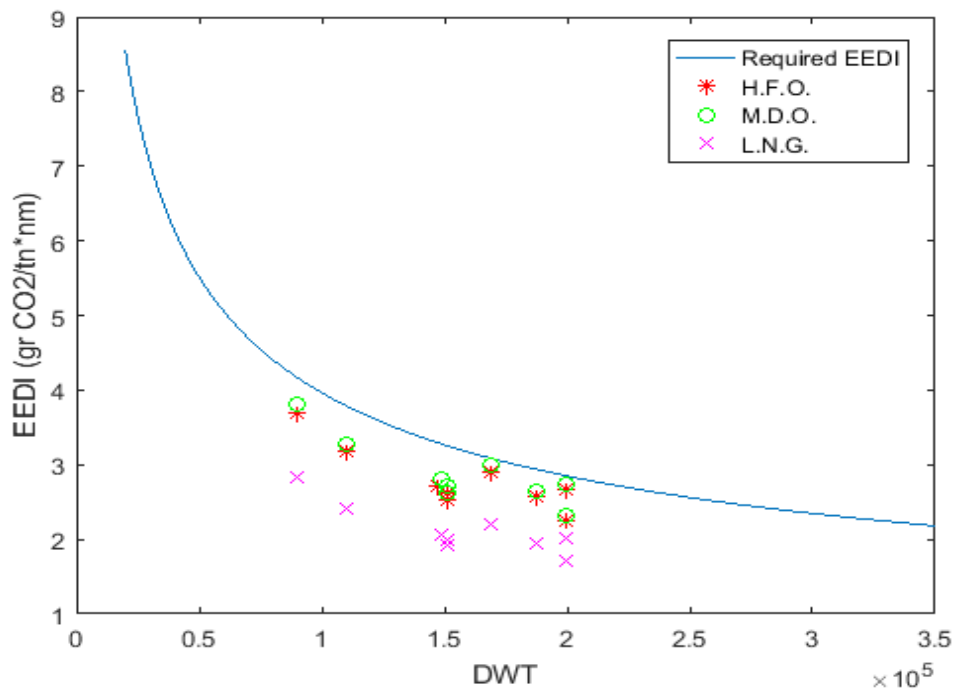
Πλοίο	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5
HFO	2.668	2.249	2.568	3.176	3.699
MDO	2.747	2.315	2.644	3.270	3.809
LNG	2.015	1.712	1.944	2.409	2.819

Πίνακας 61: Εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά τονομίλι 1<sup>ου</sup> στόλου 1<sup>ο</sup> σενάριο

**Δείκτης EEDI - Στόλος 2 [gr CO<sub>2</sub>/tn · nm]**

Πλοίο	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10
HFO	2.899	2.899	2.625	2.536	2.716
MDO	2.985	2.985	2.703	2.610	3.809
LNG	2.191	2.191	1.988	1.921	2.055

Πίνακας 62: Εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά τονομίλι 2<sup>ου</sup> στόλου 1<sup>ο</sup> σενάριο



Διάγραμμα 25: Εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά τονομίλι 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> στόλου 1<sup>ο</sup> σενάριο

Διαπιστώνεται ότι οι εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά τονομίλι, όπως προέκυψαν από την μελέτη των δύο στόλων, κινούνται εντός των ορίων που θέτει ο IMO.

#### Εκπομπές NO<sub>x</sub> ανά κιλοβατώρα - Στόλος 1 [*gr/kWh*]

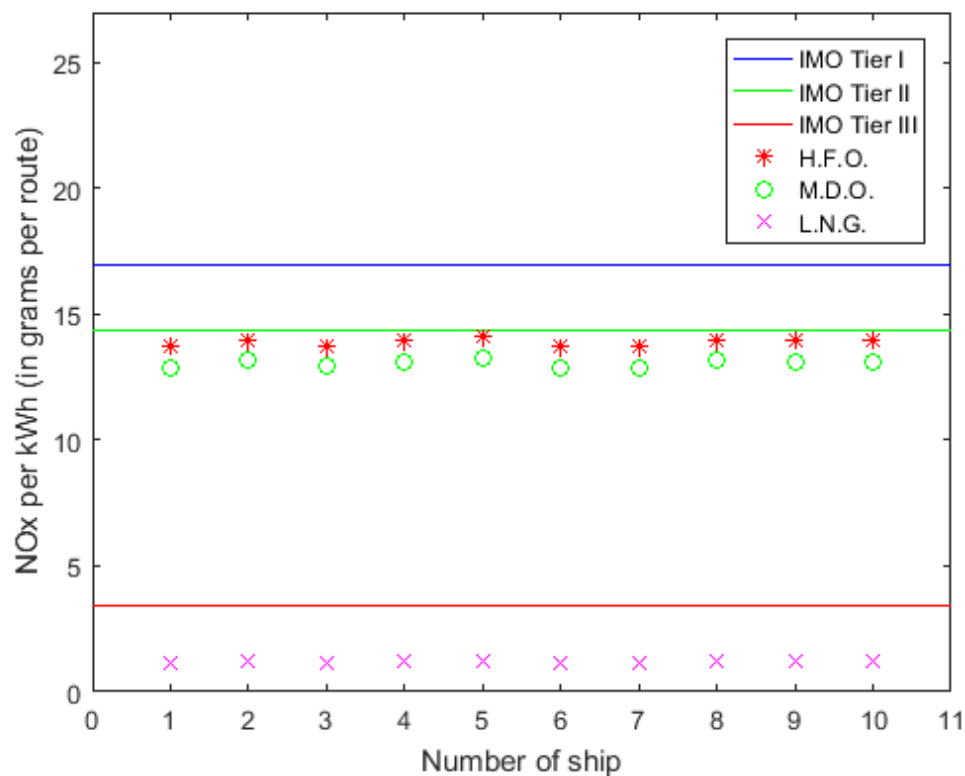
Πλοίο	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5
HFO	13.728	13.996	13.763	13.954	14.099
MDO	12.904	13.155	12.937	13.116	13.252
LNG	1.171	1.204	1.177	1.196	1.214

Πίνακας 63: Εκπομπές NO<sub>x</sub> ανά κιλοβατώρα 1<sup>ου</sup> στόλου 1<sup>ο</sup> σενάριο

#### Εκπομπές NO<sub>x</sub> ανά κιλοβατώρα - Στόλος 2 [*gr/kWh*]

Πλοίο	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10
HFO	13.716	13.716	13.986	13.942	13.969
MDO	12.893	12.893	13.147	13.105	13.130
LNG	1.172	1.172	1.197	1.194	1.194

Πίνακας 64: Εκπομπές NO<sub>x</sub> ανά κιλοβατώρα 2<sup>ου</sup> στόλου 1<sup>ο</sup> σενάριο



Διάγραμμα 26: Εκπομπές NO<sub>x</sub> ανά κιλοβατώρα 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> στόλου 1<sup>ο</sup> σενάριο

Τα όρια που εμφανίζονται στο παραπάνω διάγραμμα ορίζονται από τον IMO, όπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω και αφορούν τις αργόστροφες μηχανές ( $n < 130 \text{ rpm}$ ).

Διαπιστώνεται ότι οι εκπομπές NO<sub>x</sub> ανά κίλοβατώρα, όπως προέκυψαν από την μελέτη, κινούνται εντός των ορίων που τίθενται από την Tier II ανεξαρτήτως του καυσίμου που χρησιμοποιείται. 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 πρόσθετων εξελιγμένων τεχνολογιών, όπως η επιλεκτική καταλυτική αναγωγή καυσαερίων (SCR) και η ανακυκλοφορία καυσαερίων (EGR) ή εναλλακτικά η καύση LNG (The HELMEPA Navigator, 2014).

## 9.2 Σενάριο 2 – Διαφορετική ταχύτητα για κάθε πλοίο

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τους βέλτιστους συνδυασμούς πλοίων τόσο για τον πρώτο όσο και για τον δεύτερο στόλο. Στο δεύτερο σενάριο λειτουργίας τα πλοία κινούνται με αυξημένες ταχύτητες ενώ εξετάζονται και τα τρία καύσιμα.

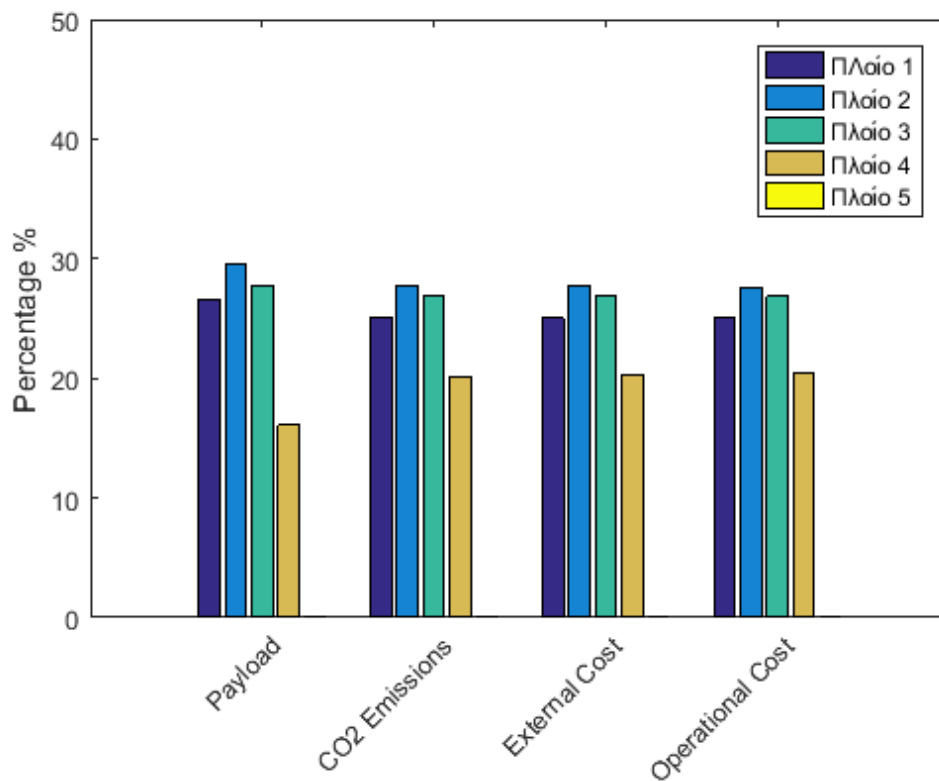
Για κάθε καύσιμο που χρησιμοποιείται οι Πίνακας 65, Πίνακας 66, Πίνακας 73, Πίνακας 74, Πίνακας 81 και Πίνακας 82 αφορούν στα γενικά δεδομένα, όπως αυτά προέκυψαν από το υπολογιστικό πρόγραμμα, για τον Στόλο 1 και τον Στόλο 2 αντίστοιχα. Οι Πίνακας 67, Πίνακας 75 και Πίνακας 83 αφορούν στα συνολικά δεδομένα για τους δύο στόλους για τη σύγκρισή τους. Κάθε ένας από τους παραπάνω πίνακες συνοδεύεται από το αντίστοιχο διάγραμμα, το οποίο διευκολύνει τη σύγκριση τόσο σε επίπεδο πλοίων, όπου παρουσιάζεται το ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου στο αντίστοιχο μέγεθος, όσο και σε επίπεδο στόλων.

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα δεδομένα όπως αυτά προέκυψαν από το υπολογιστικό πρόγραμμα, τα οποία απαιτούνται από τον κανονισμό MRV. Οι Πίνακας 68, Πίνακας 69, Πίνακας 76, Πίνακας 77, Πίνακας 84 και Πίνακας 85 αφορούν στα δεδομένα ανά διαδρομή κάθε πλοίου για τον Στόλο 1 και τον Στόλο 2 αντίστοιχα. Οι Πίνακας 70, Πίνακας 71, Πίνακας 78, Πίνακας 79, Πίνακας 86 και Πίνακας 87 αφορούν στα δεδομένα ανά έτος λειτουργίας κάθε πλοίου για τον Στόλο 1 και τον Στόλο 2 αντίστοιχα, ενώ οι Πίνακας 72, Πίνακας 80 και Πίνακας 88 αφορούν στα συνολικά δεδομένα για ένα έτος λειτουργίας των δύο στόλων.

## 9.2.1 Καύσιμο ΗΦΟ

## Γενικά δεδομένα - Στόλος 1

Πλοίο	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5
Ταξίδια	9	10	10	10	-
Φορτίο	1728369	1917800	1807720	1046111	-
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	34340	38034	36924	27636	-
Εξωτερικό κόστος	5293725	5863635	5691920	4305895	-
Κόστος λειτουργίας	4355493	4799966	4662038	3549919	-

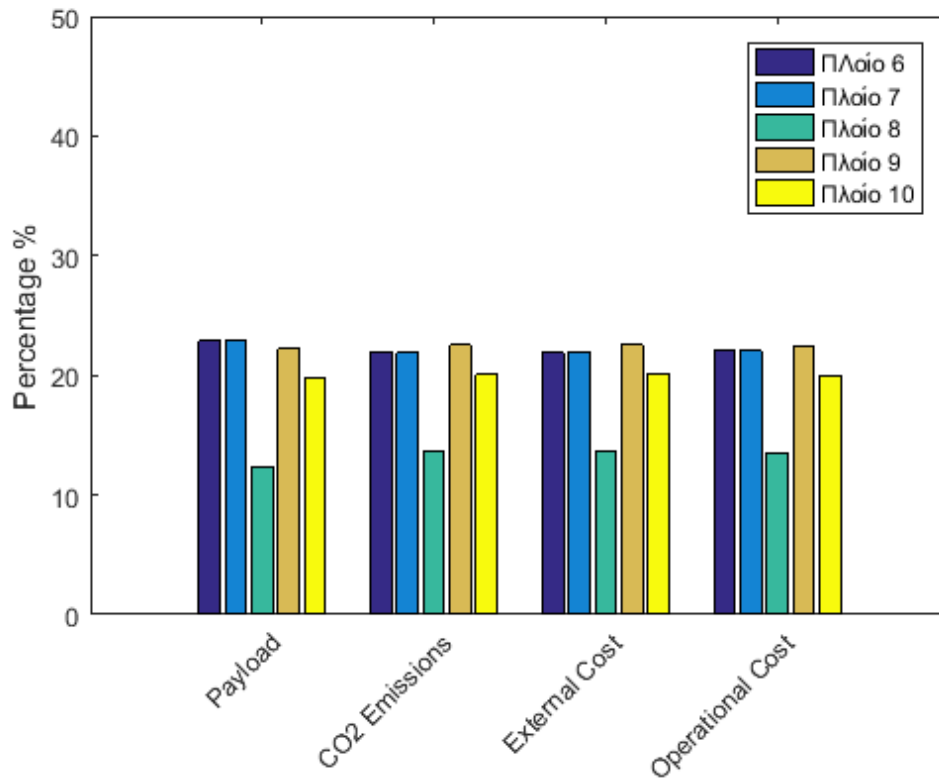
Πίνακας 65: Γενικά δεδομένα βέλτιστου συνδυασμού 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο ΗΦΟ 2<sup>ο</sup> σενάριοΔιάγραμμα 27: Ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου του 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο ΗΦΟ 2<sup>ο</sup> σενάριο

## Γενικά δεδομένα - Στόλος 2

Πλοίο	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10
Ταξίδια	9	9	6	10	9

<b>Φορτίο</b>	1487394	1487385	801958	1442500	1280763	<i>tn</i>
<b>Εκπομπές CO<sub>2</sub></b>	31654	31654	19624	32558	29009	<i>tn</i>
<b>Εξωτερικό κόστος</b>	4879099	4879099	3025082	5019236	4472311	<i>EUROS</i>
<b>Κόστος λειτουργίας</b>	4033014	4033014	2474433	4112200	3660680	<i>EUROS</i>

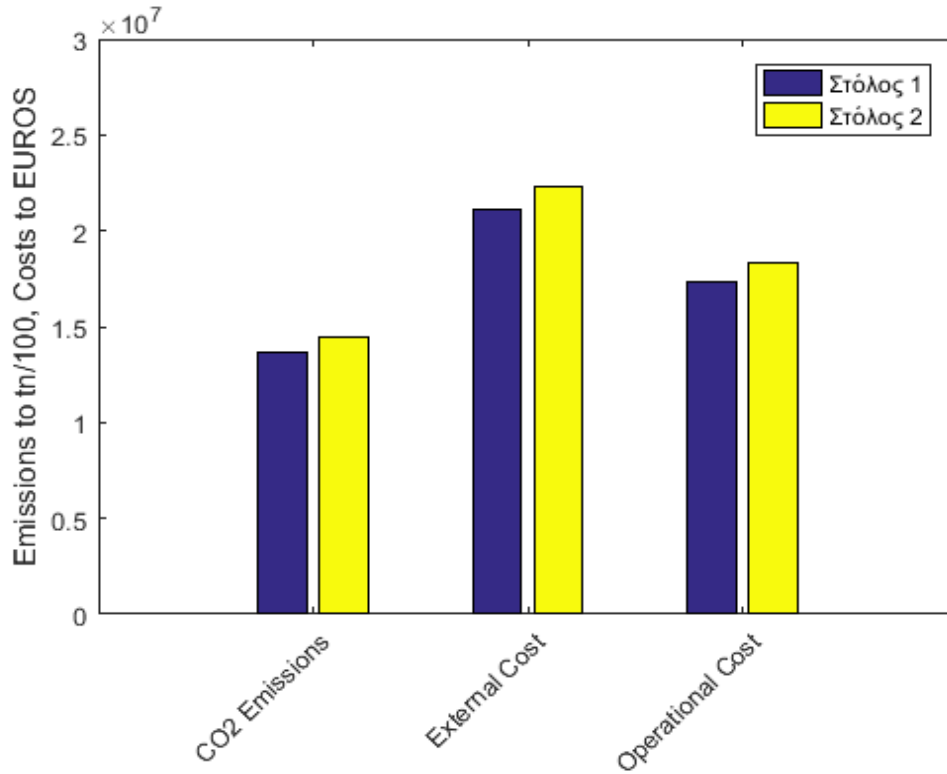
Πίνακας 66: Γενικά δεδομένα βέλτιστου συνδυασμού 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 2<sup>ο</sup> σενάριο



Διάγραμμα 28: Ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου του 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 2<sup>ο</sup> σενάριο

<b>Συνολικά δεδομένα</b>			
<b>Στόλος</b>	<b>Στόλος 1</b>	<b>Στόλος 2</b>	
<b>Ταξίδια</b>	39	43	-
<b>Φορτίο</b>	6500000	6500000	<i>tn</i>
<b>Εκπομπές CO<sub>2</sub></b>	136935	144499	<i>tn</i>
<b>Εξωτερικό κόστος</b>	21155176	22274828	<i>EUROS</i>
<b>Κόστος λειτουργίας</b>	17367417	18313340	<i>EUROS</i>

Πίνακας 67: Συνολικά δεδομένα 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 2<sup>ο</sup> σενάριο



Διάγραμμα 29: Σύγκριση 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 2<sup>ο</sup> σενάριο

Στο παραπάνω διάγραμμα σημειώνεται ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι πολλαπλασιασμένες με  $10^2$ , ώστε να καταστεί εφικτή η σύγκρισή τους χρησιμοποιώντας τον ίδιο άξονα αναφοράς.

#### Δεδομένα ανά διαδρομή - Στόλος 1

Πλοίο	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5	
Κατανάλωση καυσίμου	514.92	523.03	500.02	378.22	-	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	1907.80	1901.72	1846.21	1381.81	-	tn
Διανυθείσα απόσταση	3619	3619	3619	3619	-	nm
Χρόνος εν πλώ	12.9	11.5	12.4	11.9	-	days
Φορτίο	192041	191780	180772	104611	-	tn
Μεταφορικό έργο	$6.95 \cdot 10^8$	$6.94 \cdot 10^8$	$6.54 \cdot 10^8$	$3.79 \cdot 10^8$	-	tn · nm

Πίνακας 68: Δεδομένα ανά διαδρομή 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 2<sup>ο</sup> σενάριο

### Δεδομένα ανά διαδρομή - Στόλος 2

Πλοίο	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10	
Κατανάλωση καυσίμου	470.62	470.62	447.86	448.56	437.87	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	1758.55	1758.55	1635.30	1627.92	1611.63	tn
Διανυθείσα απόσταση	3619	3619	3619	3619	3619	nm
Χρόνος εν πλώ	13.0	13.0	11.7	11.4	12.0	days
Φορτίο	165266	165265	133660	144250	142307	tn
Μεταφορικό έργο	$5.98 \cdot 10^8$	$5.98 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	$5.22 \cdot 10^8$	$5.15 \cdot 10^8$	tn · nm

Πίνακας 69: Δεδομένα ανά διαδρομή 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 2<sup>ο</sup> σενάριο

### Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας - Στόλος 1

Πλοίο	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5	
Κατανάλωση καυσίμου	9269	10461	10000	7564	-	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	34340	38034	36924	27636	-	tn
Διανυθείσα απόσταση	65142	72380	72380	72380	-	tn
Χρόνος εν πλώ	232	230	247	237	-	nm
Φορτίο	$1.73 \cdot 10^6$	$1.92 \cdot 10^6$	$1.81 \cdot 10^6$	$1.05 \cdot 10^6$	-	days
Μεταφορικό έργο	$1.13 \cdot 10^{11}$	$1.39 \cdot 10^{11}$	$1.31 \cdot 10^{11}$	$7.57 \cdot 10^{10}$	-	tn
Κατανάλωση καυσίμου	0.142	0.145	0.138	0.105	-	$\frac{tn}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση	8.23	7.54	7.64	9.99	-	$\frac{tn}{nm}$
Κατανάλωση καυσίμου	$\cdot 10^{-8}$	$\cdot 10^{-8}$	$\cdot 10^{-8}$	$\cdot 10^{-8}$	-	$\frac{tn}{nm}$
Μεταφορικό έργο	527161	525482	510144	381820	-	$\frac{gr}{nm}$
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	0.305	0.274	0.282	0.365	-	$\frac{gr}{nm}$
Μεταφορικό έργο						tn · nm

Πίνακας 70: Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 2<sup>ο</sup> σενάριο



### Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας - Στόλος 2

Πλοίο	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10	
Κατανάλωση καυσίμου	8471	8471	5374	8971	7882	<i>tn</i>
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	31654	31654	19624	32558	29009	<i>tn</i>
Διανυθείσα απόσταση	65142	65142	43428	72380	65142	<i>tn</i>
Χρόνος εν πλώ	234	234	140	228	215	<i>nm</i>
Φορτίο	1.49 · 10 <sup>6</sup>	1.49 · 10 <sup>6</sup>	8.02 · 10 <sup>5</sup>	1.44 · 10 <sup>6</sup>	1.28 · 10 <sup>6</sup>	<i>days</i>
Μεταφορικό έργο	9.69 · 10 <sup>10</sup>	9.69 · 10 <sup>10</sup>	3.48 · 10 <sup>10</sup>	1.04 · 10 <sup>11</sup>	8.34 · 10 <sup>10</sup>	<i>tn</i>
Κατανάλωση καυσίμου	0.130	0.130	0.124	0.124	0.121	$\frac{tn}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση						<i>nm</i>
Κατανάλωση καυσίμου	8.74 · 10 <sup>-8</sup>	8.74 · 10 <sup>-7</sup>	1.54 · 10 <sup>-7</sup>	8.59 · 10 <sup>-8</sup>	9.45 · 10 <sup>-8</sup>	$\frac{tn}{nm}$
Μεταφορικό έργο						<i>tn · nm</i>
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	485922	485922	451865	449825	445325	$\frac{gr}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση						<i>nm</i>
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	0.327	0.327	0.563	0.312	0.348	$\frac{gr}{tn · nm}$
Μεταφορικό έργο						<i>tn · nm</i>

Πίνακας 71: Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο HFO 2<sup>ο</sup> σενάριο

### Συνολικά δεδομένα για ένα έτος λειτουργία

Στόλος	Στόλος 1	Στόλος 2	
Κατανάλωση καυσίμου	37294	39169	<i>tn</i>
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	136935	144499	<i>tn</i>
Διανυθείσα απόσταση	282282	311234	<i>nm</i>
Χρόνος εν πλώ	947	1052	<i>days</i>
Μεταφερόμενο φορτίο	6500000	6500000	<i>tn</i>
Μεταφορικό έργο	4.58 · 10 <sup>11</sup>	4.16 · 10 <sup>11</sup>	<i>tn · nm</i>
Κατανάλωση καυσίμου	0.132	0.126	$\frac{tn}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση			<i>nm</i>
Κατανάλωση καυσίμου	8.14 · 10 <sup>-8</sup>	9.14 · 10 <sup>-8</sup>	$\frac{tn}{nm}$
Μεταφορικό έργο			<i>tn · nm</i>
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	485100	464278	$\frac{gr}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση			<i>nm</i>

**Εκπομπές CO<sub>2</sub>**  
**Μεταφορικό έργο**

0.299

0.347

 $\frac{gr}{tn \cdot nm}$ 

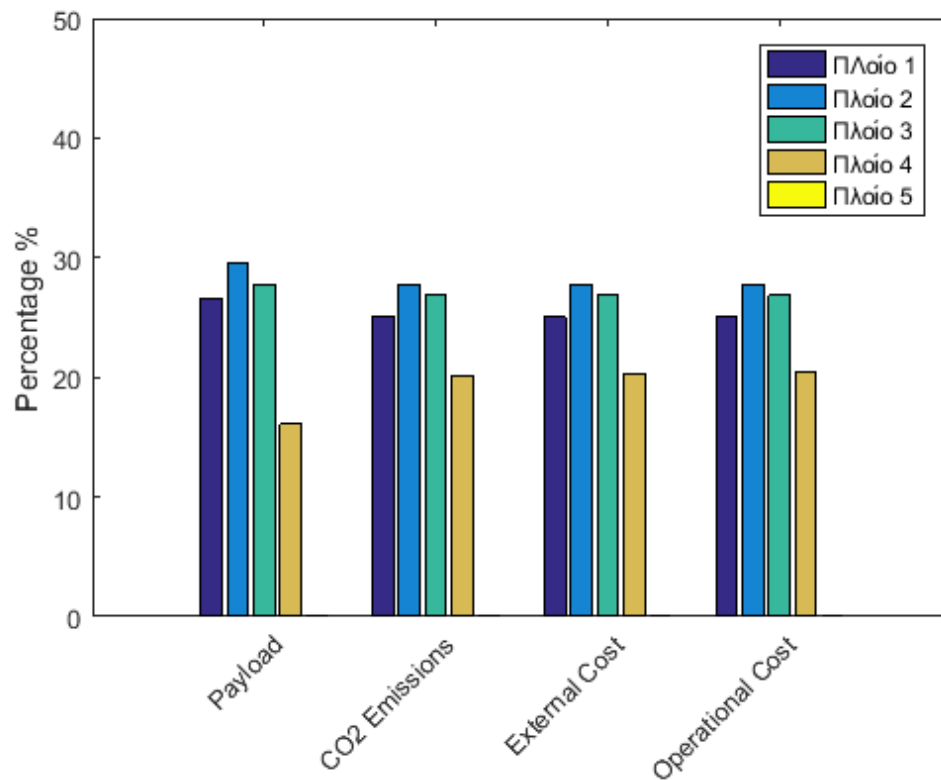
Πίνακας 72: Συνολικά δεδομένα για ένα έτος λειτουργίας 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> με καύσιμο ΗΦΟ 2<sup>ο</sup> σενάριο

### 9.2.2 Καύσιμο MDO

#### Γενικά δεδομένα - Στόλος 1

Πλοίο	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5	
Ταξίδια	9	10	10	10	-	-
Φορτίο	1728369	1917800	1807720	1046111	-	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	35355	39158	38015	28404	-	tn
Εξωτερικό κόστος	3362903	3724931	3616722	2729166	-	EUROS
Κόστος λειτουργίας	6083015	6749667	6525947	4959818	-	EUROS

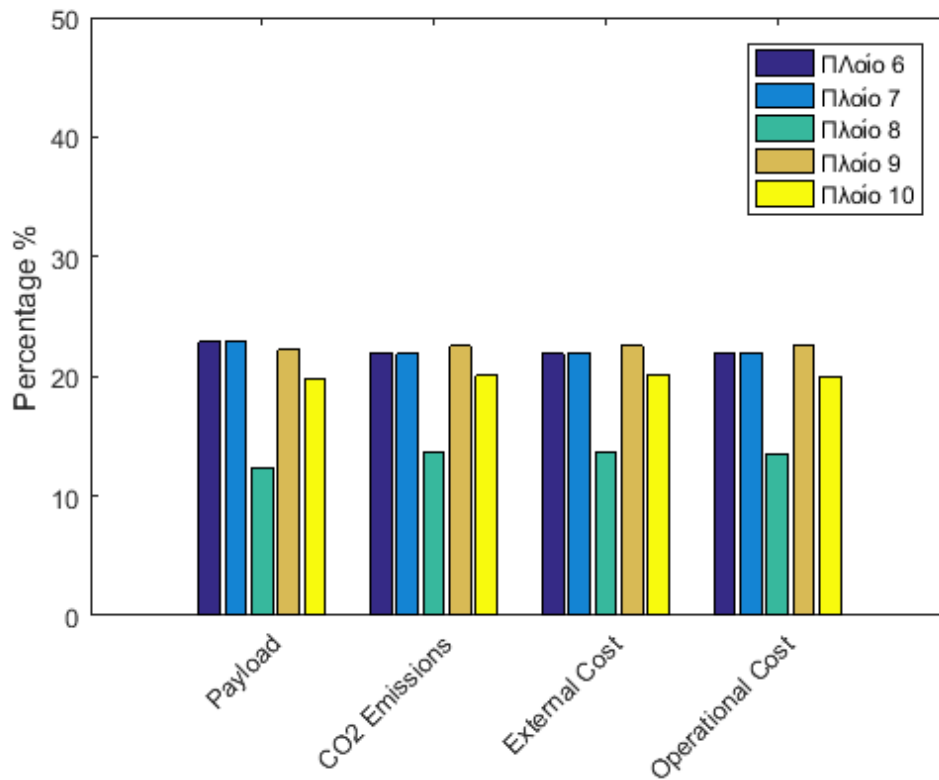
Πίνακας 73: Γενικά δεδομένα βέλτιστου συνδυασμού 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 2<sup>ο</sup> σενάριο



Διάγραμμα 30: Ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου του 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 2<sup>ο</sup> σενάριο

## Γενικά δεδομένα - Στόλος 2

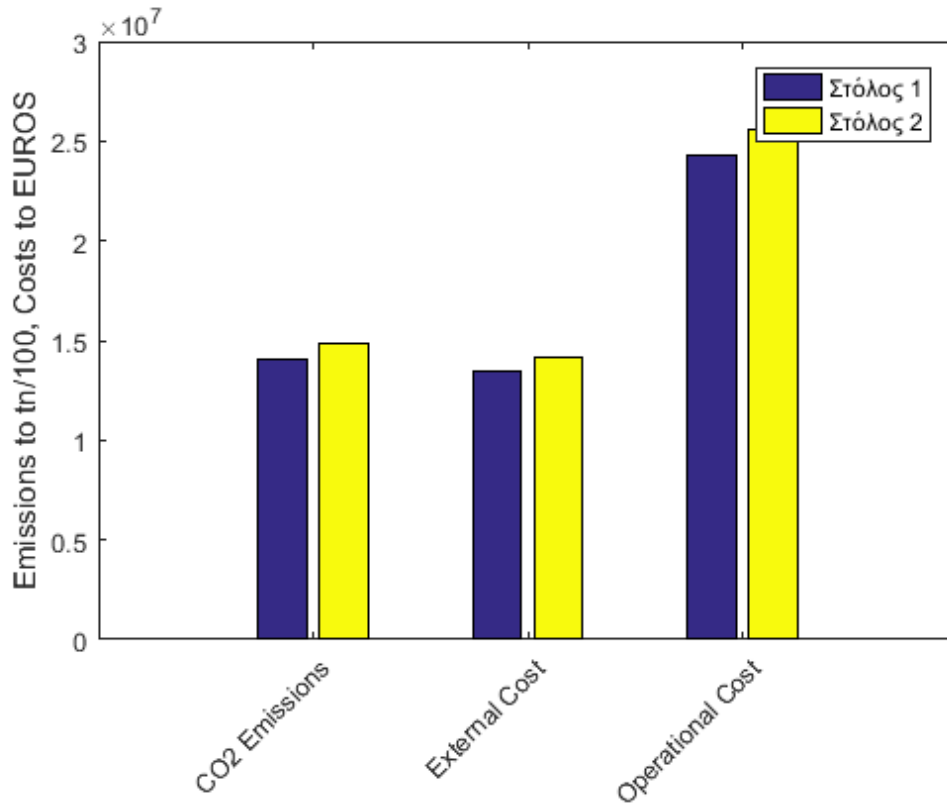
Πλοίο	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10	
Ταξίδια	9	9	6	10	9	-
Φορτίο	1487394	1487385	801958	1442500	1280763	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	32589	32589	20203	33520	29866	tn
Εξωτερικό κόστος	3100279	3100279	1922046	3189396	2841925	EUROS
Κόστος λειτουργίας	5611905	5611905	3476118	5784299	5129697	EUROS

Πίνακας 74: Γενικά δεδομένα βέλτιστου συνδυασμού 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 2<sup>ο</sup> σενάριοΔιάγραμμα 31: Ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου του 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 2<sup>ο</sup> σενάριο

## Συνολικά δεδομένα

Στόλος	Στόλος 1	Στόλος 2	
Ταξίδια	39	43	-
Φορτίο	6500000	6500000	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	140932	148768	tn
Εξωτερικό κόστος	13433721	14153926	EUROS
Κόστος λειτουργίας	24318448	25613923	EUROS

Πίνακας 75: Συνολικά δεδομένα 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 2<sup>ο</sup> σενάριο



Διάγραμμα 32: Σύγκριση 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 2<sup>ο</sup> σενάριο

Στο παραπάνω διάγραμμα σημειώνεται ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι πολλαπλασιασμένες με  $10^2$ , ώστε να καταστεί εφικτή η σύγκρισή τους χρησιμοποιώντας τον ίδιο άξονα αναφοράς.

#### Δεδομένα ανά διαδρομή - Στόλος 1

Πλοίο	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5	
Κατανάλωση καυσίμου	514.92	523.03	500.02	378.22	-	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	1964.15	1957.91	1900.76	1420.22	-	tn
Διανυθείσα απόσταση	3619	3619	3619	3619	-	nm
Χρόνος εν πλώ	12.9	11.5	12.4	11.9	-	days
Φορτίο	192041	191780	180772	104611	-	tn
Μεταφορικό έργο	$6.95 \cdot 10^8$	$6.94 \cdot 10^8$	$6.54 \cdot 10^8$	$3.79 \cdot 10^8$	-	tn · nm

Πίνακας 76: Δεδομένα ανά διαδρομή 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 2<sup>ο</sup> σενάριο

### Δεδομένα ανά διαδρομή - Στόλος 2

Πλοίο	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10	
Κατανάλωση καυσίμου	470.62	470.62	447.86	448.56	437.87	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	1810.51	1810.51	1683.62	1676.01	1659.25	tn
Διανυθείσα απόσταση	3619	3619	3619	3619	3619	nm
Χρόνος εν πλώ	13.0	13.0	11.7	11.4	12.0	days
Φορτίο	165266	165265	133660	144250	142307	tn
Μεταφορικό έργο	$5.98 \cdot 10^8$	$5.98 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	$5.22 \cdot 10^8$	$5.15 \cdot 10^8$	tn · nm

Πίνακας 77: Δεδομένα ανά διαδρομή 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 2<sup>ο</sup> σενάριο

### Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας - Στόλος 1

Πλοίο	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5	
Κατανάλωση καυσίμου	9269	10461	10000	7564	-	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	35355	39158	38015	28404	-	tn
Διανυθείσα απόσταση	65142	72380	72380	72380	-	tn
Χρόνος εν πλώ	232	230	247	237	-	nm
Φορτίο	$1.73 \cdot 10^6$	$1.92 \cdot 10^6$	$1.81 \cdot 10^6$	$1.05 \cdot 10^6$	-	days
Μεταφορικό έργο	$1.13 \cdot 10^{11}$	$1.39 \cdot 10^{11}$	$1.31 \cdot 10^{11}$	$7.57 \cdot 10^{10}$	-	tn
Κατανάλωση καυσίμου	0.142	0.145	0.138	0.105	-	$\frac{tn}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση	8.23	7.54	7.64	9.99	-	tn
Κατανάλωση καυσίμου	$\cdot 10^{-8}$	$\cdot 10^{-8}$	$\cdot 10^{-8}$	$\cdot 10^{-8}$	-	$\frac{tn \cdot nm}{gr}$
Μεταφορικό έργο Εκπομπές CO <sub>2</sub>	542731	541007	525216	392434	-	$\frac{gr}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση Εκπομπές CO <sub>2</sub>	0.314	0.282	0.291	0.375	-	$\frac{gr}{tn \cdot nm}$
Μεταφορικό έργο						

Πίνακας 78: Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 2<sup>ο</sup> σενάριο

### Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας - Στόλος 2

Πλοίο	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10	
Κατανάλωση καυσίμου	8471	8471	5374	8971	7882	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	32589	32589	20203	33520	29866	tn
Διανυθείσα απόσταση	65142	65142	43428	72380	65142	tn
Χρόνος εν πλώ	234	234	140	228	215	nm
Φορτίο	1.49 · 10 <sup>6</sup>	1.49 · 10 <sup>6</sup>	8.02 · 10 <sup>5</sup>	1.44 · 10 <sup>6</sup>	1.28 · 10 <sup>6</sup>	days
Μεταφορικό έργο	9.69 · 10 <sup>10</sup>	9.69 · 10 <sup>10</sup>	3.48 · 10 <sup>10</sup>	1.04 · 10 <sup>11</sup>	8.34 · 10 <sup>10</sup>	tn
Κατανάλωση καυσίμου	0.130	0.130	0.124	0.124	0.121	$\frac{tn}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση						nm
Κατανάλωση καυσίμου	8.74 · 10 <sup>-8</sup>	8.74 · 10 <sup>-8</sup>	1.54 · 10 <sup>-7</sup>	8.59 · 10 <sup>-8</sup>	9.45 · 10 <sup>-8</sup>	$\frac{tn}{nm}$
Μεταφορικό έργο						tn · nm
Εκπομπές CO <sub>2</sub>						$\frac{gr}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση	500278	500278	465216	463114	458482	nm
Εκπομπές CO <sub>2</sub>						$\frac{gr}{nm}$
Μεταφορικό έργο	0.336	0.336	0.580	0.321	0.358	tn · nm

Πίνακας 79: Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο MDO 2<sup>ο</sup> σενάριο

### Συνολικά δεδομένα για ένα έτος λειτουργία

Στόλος	Στόλος 1	Στόλος 2	
Κατανάλωση καυσίμου	37294	39169	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	140932	148768	tn
Διανυθείσα απόσταση	282282	311234	nm
Χρόνος εν πλώ	947	1052	days
Μεταφερόμενο φορτίο	6500000	6500000	tn
Μεταφορικό έργο	4.58 · 10 <sup>11</sup>	4.16 · 10 <sup>11</sup>	tn · nm
Κατανάλωση καυσίμου	0.132	0.126	$\frac{tn}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση			nm
Κατανάλωση καυσίμου	8.14 · 10 <sup>-8</sup>	9.41 · 10 <sup>-8</sup>	$\frac{tn}{nm}$
Μεταφορικό έργο			tn · nm
Εκπομπές CO <sub>2</sub>			$\frac{gr}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση	499260	477995	nm

<b>Εκπομπές CO<sub>2</sub></b> <b>Μεταφορικό έργο</b>	0.308	0.357	$\frac{gr}{tn \cdot nm}$
--	-------	-------	--------------------------

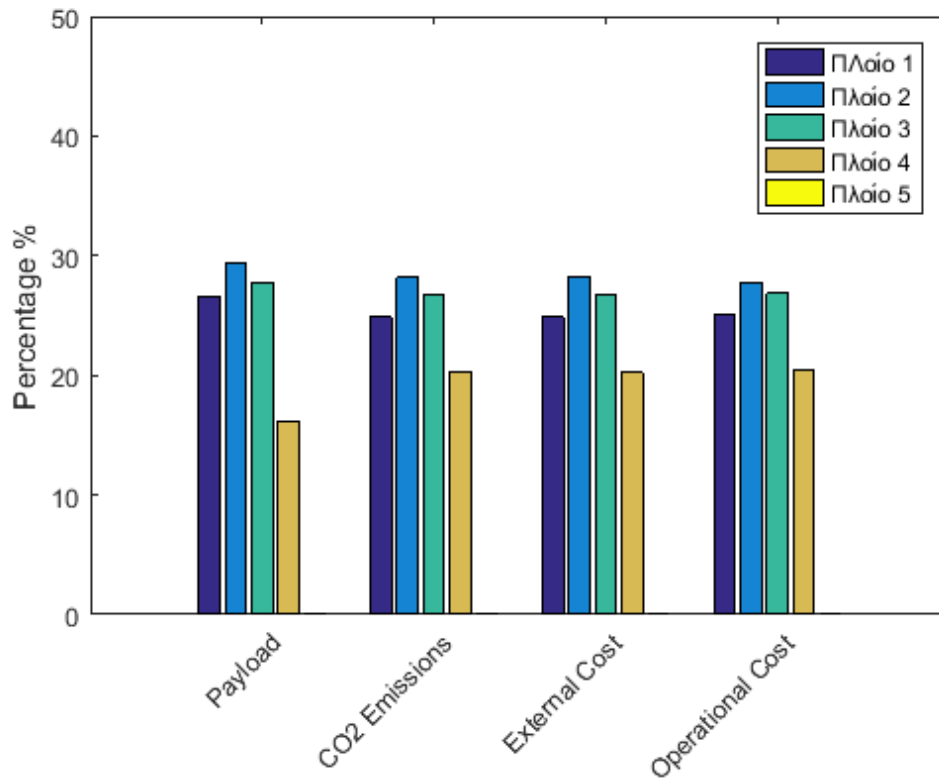
Πίνακας 80: Συνολικά δεδομένα για ένα έτος λειτουργίας 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> με καύσιμο MDO 2<sup>ο</sup> σενάριο

### 9.2.3 Καύσιμο LNG

#### Γενικά δεδομένα - Στόλος 1

Πλοίο	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5	
Ταξίδια	9	10	10	10	-	-
Φορτίο	1728369	1914351	1807720	1049560	-	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	25896	29389	27817	21080	-	tn
Εξωτερικό κόστος	1649998	1872216	1771557	1342483	-	EUROS
Κόστος λειτουργίας	4522880	4998865	4842640	3676630	-	EUROS

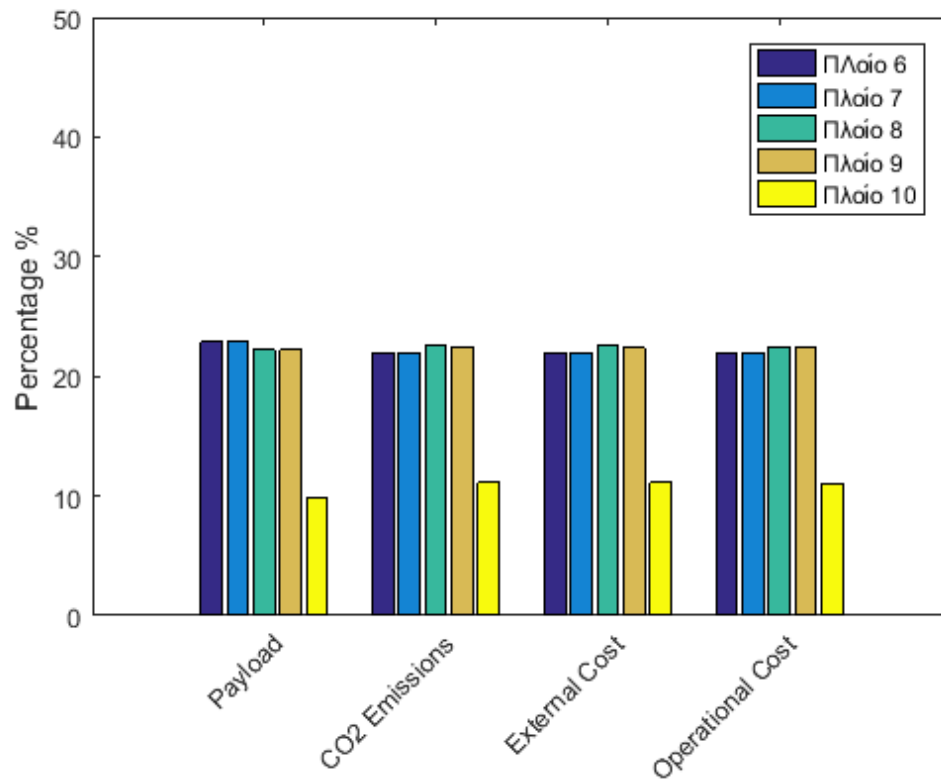
Πίνακας 81: Γενικά δεδομένα βέλτιστου συνδυασμού 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 2<sup>ο</sup> σενάριο



Διάγραμμα 33: Ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου του 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 2<sup>ο</sup> σενάριο

## Γενικά δεδομένα - Στόλος 2

Πλοίο	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10	
Ταξίδια	9	9	10	10	5	-
Φορτίο	1487394	1487385	1443790	1442500	638931	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	23908	23908	24532	24382	12102	tn
Εξωτερικό κόστος	1523043	1523043	1562749	1553444	771081	EUROS
Κόστος λειτουργίας	4185999	4185999	4274095	4258125	2107058	EUROS

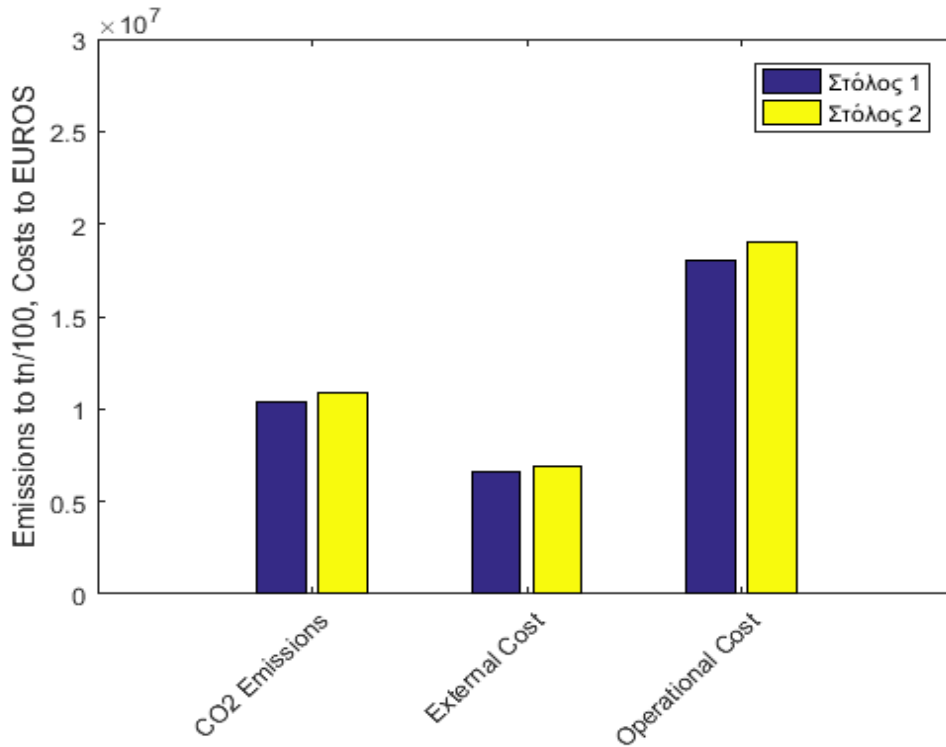
Πίνακας 82: Γενικά δεδομένα βέλτιστου συνδυασμού 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 2<sup>ο</sup> σενάριοΔιάγραμμα 34: Ποσοστό συνεισφοράς κάθε πλοίου του 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 2<sup>ο</sup> σενάριο

## Συνολικά δεδομένα

Στόλος	Στόλος 1	Στόλος 2	
Ταξίδια	39	43	-
Φορτίο	6500000	6500000	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	104182	108832	tn
Εξωτερικό κόστος	6636255	6933360	EUROS
Κόστος λειτουργίας	18041015	19011275	EUROS

Πίνακας 83: Συνολικά δεδομένα 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 2<sup>ο</sup> σενάριο





Διάγραμμα 35: Σύγκριση 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 2<sup>ο</sup> σενάριο

Στο παραπάνω διάγραμμα σημειώνεται ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι πολλαπλασιασμένες με  $10^2$ , ώστε να καταστεί εφικτή η σύγκρισή τους χρησιμοποιώντας τον ίδιο άξονα αναφοράς.

#### Δεδομένα ανά διαδρομή - Στόλος 1

Πλοίο	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5	
Κατανάλωση καυσίμου	425.50	433.28	413.19	311.48	-	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	1438.66	1469.47	1390.85	1053.99	-	tn
Διανυθείσα απόσταση	3619	3619	3619	3619	-	nm
Χρόνος εν πλώ	12.9	11.5	12.4	11.9	-	days
Φορτίο	192041	191435	180772	104956	-	tn
Μεταφορικό έργο	$6.95 \cdot 10^8$	$6.93 \cdot 10^8$	$6.54 \cdot 10^8$	$3.80 \cdot 10^8$	-	tn · nm

Πίνακας 84: Δεδομένα ανά διαδρομή 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 2<sup>ο</sup> σενάριο

### Δεδομένα ανά διαδρομή - Στόλος 2

Πλοίο	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10	
Κατανάλωση καυσίμου	388.89	388.89	368.82	368.93	360.60	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	1328.24	1328.24	1226.61	1219.11	1210.18	tn
Διανυθείσα απόσταση	3619	3619	3619	3619	3619	nm
Χρόνος εν πλώ	13.0	13.0	11.7	11.4	12.0	days
Φορτίο	165266	165265	144379	144250	127786	tn
Μεταφορικό έργο	$5.98 \cdot 10^8$	$5.98 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	$5.22 \cdot 10^8$	$4.62 \cdot 10^8$	tn · nm

Πίνακας 85: Δεδομένα ανά διαδρομή 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 2<sup>ο</sup> σενάριο

### Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας - Στόλος 1

Πλοίο	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5	
Κατανάλωση καυσίμου	7659	8666	8264	6230	-	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	25896	29389	27817	21080	-	tn
Διανυθείσα απόσταση	65142	72380	72380	72380	-	tn
Χρόνος εν πλώ	232	230	247	237	-	nm
Φορτίο	$1.73 \cdot 10^6$	$1.91 \cdot 10^6$	$1.81 \cdot 10^6$	$1.05 \cdot 10^6$	-	days
Μεταφορικό έργο	$1.13 \cdot 10^{11}$	$1.39 \cdot 10^{11}$	$1.31 \cdot 10^{11}$	$7.60 \cdot 10^{10}$	-	tn
Κατανάλωση καυσίμου	0.118	0.120	0.114	0.086	-	$\frac{tn}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση	6.80	6.25	6.32	8.20	-	tn
Κατανάλωση καυσίμου	$\cdot 10^{-8}$	$\cdot 10^{-8}$	$\cdot 10^{-8}$	$\cdot 10^{-8}$	-	$\frac{tn \cdot nm}{gr}$
Μεταφορικό έργο	397528	406043	384319	291237	-	$\frac{gr}{nm}$
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	0.230	0.212	0.213	0.277	-	$\frac{gr}{tn \cdot nm}$
Διανυθείσα απόσταση						
Εκπομπές CO <sub>2</sub>						
Μεταφορικό έργο						

Πίνακας 86: Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας 1<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 2<sup>ο</sup> σενάριο

## Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας - Στόλος 2

Πλοίο	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10	
Κατανάλωση καυσίμου	7000	7000	7376	7379	3606	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	23908	23908	24532	24382	12102	tn
Διανυθείσα απόσταση	65142	65142	72380	72380	36190	tn
Χρόνος εν πλώ	234	234	234	228	120	nm
Φορτίο	1.49 · 10 <sup>6</sup>	1.49 · 10 <sup>6</sup>	1.44 · 10 <sup>6</sup>	1.44 · 10 <sup>6</sup>	6.39 · 10 <sup>5</sup>	days
Μεταφορικό έργο	9.69 · 10 <sup>10</sup>	9.69 · 10 <sup>10</sup>	1.05 · 10 <sup>11</sup>	1.04 · 10 <sup>11</sup>	2.31 · 10 <sup>10</sup>	tn
Κατανάλωση καυσίμου	0.107	0.107	0.102	0.102	0.100	$\frac{tn}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση						nm
Κατανάλωση καυσίμου	7.22 · 10 <sup>-8</sup>	7.22 · 10 <sup>-8</sup>	7.06 · 10 <sup>-8</sup>	7.07 · 10 <sup>-8</sup>	1.56 · 10 <sup>-7</sup>	$\frac{tn}{nm}$
Μεταφορικό έργο						tn · nm
Εκπομπές CO <sub>2</sub>						$\frac{gr}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση	367017	367017	338935	336862	334395	nm
Εκπομπές CO <sub>2</sub>						$\frac{gr}{nm}$
Μεταφορικό έργο	0.247	0.247	0.235	0.234	0.523	$\frac{gr}{tn \cdot nm}$

Πίνακας 87: Δεδομένα ανά έτος λειτουργίας 2<sup>ου</sup> στόλου με καύσιμο LNG 2<sup>ο</sup> σενάριο

## Συνολικά δεδομένα για ένα έτος λειτουργία

Στόλος	Στόλος 1	Στόλος 2	
Κατανάλωση καυσίμου	30818	32361	tn
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	104182	108832	tn
Διανυθείσα απόσταση	282282	311234	nm
Χρόνος εν πλώ	947	1050	days
Μεταφερόμενο φορτίο	6500000	6500000	tn
Μεταφορικό έργο	4.58 · 10 <sup>11</sup>	4.26 · 10 <sup>11</sup>	tn · nm
Κατανάλωση καυσίμου	0.109	0.104	$\frac{tn}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση			nm
Κατανάλωση καυσίμου	6.73 · 10 <sup>-8</sup>	7.60 · 10 <sup>-8</sup>	$\frac{tn}{nm}$
Μεταφορικό έργο			tn · nm
Εκπομπές CO <sub>2</sub>			$\frac{gr}{nm}$
Διανυθείσα απόσταση	369070	349680	nm

<b>Εκπομπές CO<sub>2</sub> Μεταφορικό έργο</b>	0.227	0.256	$\frac{gr}{tn \cdot nm}$
--	-------	-------	--------------------------

**Πίνακας 88:** Συνολικά δεδομένα για ένα έτος λειτουργίας 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> με καύσιμο LNG 2<sup>ο</sup> σενάριο

#### 9.2.4 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων και σύγκριση για τα τρία είδη καυσίμων

Παρατηρώντας τα Διάγραμμα 27, Διάγραμμα 30 και Διάγραμμα 33 που αφορούν στο ποσοστό συνεισφοράς μεταξύ των πλοίων του Στόλου 1 στη μεταφορά φορτίου, στις εκπομπές CO<sub>2</sub>, στο εξωτερικό κόστος και στο κόστος λειτουργίας, διαπιστώνεται ότι τα ποσοστά διαφέρουν για κάθε μέγεθος. Όπως και στο πρώτο σενάριο, παρατηρείται ότι το Πλοίο 2 είναι το πιο αποδοτικό καθώς έχει ποσοστό συνεισφοράς στο μεταφερόμενο φορτίο περίπου 30%, ενώ στα υπόλοιπα μεγέθη περίπου 28%. Το Πλοίο 4 έχει μικρότερο ποσοστό συνεισφοράς στη μεταφορά φορτίου με ποσοστά 16 % σε σχέση με τα ποσοστά συνεισφοράς στα υπόλοιπα μεγέθη που είναι περίπου 20%. Δεδομένου ότι το πρόγραμμα κάνει βελτιστοποίηση των τριών κριτηρίων, το Πλοίο 5, που, όπως προέκυψε από το πρώτο σενάριο, είναι το λιγότερο αποδοτικό, δεν χρησιμοποιείται καθόλου, εφόσον η ζήτηση καλύπτεται από τα υπόλοιπα πλοία του στόλου.

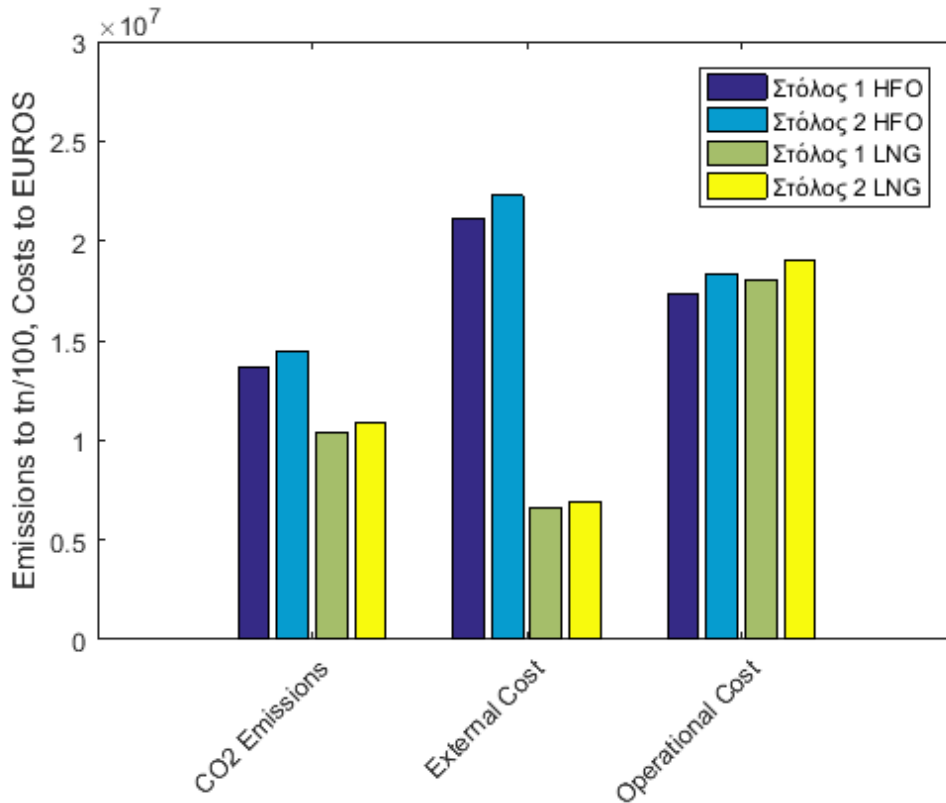
Στον Στόλο2 από τα Διάγραμμα 28, Διάγραμμα 31 και Διάγραμμα 34 παρατηρείται ότι τα πλοία δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές στα ποσοστά συνεισφοράς στα υπό μελέτη μεγέθη στο δεύτερο σενάριο ταχυτήτων.

Στον Πίνακας 89 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα συνολικά δεδομένα των δύο στόλων για HFO και MDO για το δεύτερο σενάριο ταχυτήτων, ενώ ακολουθεί και το αντίστοιχο διάγραμμα.

#### Συνολικά δεδομένα

<b>Στόλος</b>	<i>Στόλος 1 HFO</i>	<i>Στόλος 2 HFO</i>	<i>Στόλος 1 LNG</i>	<i>Στόλος 2 LNG</i>
<b>Εκπομπές CO<sub>2</sub> [tn]</b>	136935	144499	104182	108832
<b>Εξωτερικό κόστος [EUROS]</b>	21155176	22274828	6636255	6933360
<b>Κόστος λειτουργίας [EUROS]</b>	17367417	18313340	18041015	19011275

**Πίνακας 89:** Συνολικά δεδομένα για του 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> στόλου για HFO και MDO 2<sup>ο</sup> σενάριο



**Διάγραμμα 36:** Σύγκριση 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> στόλου για HFO και MDO 2<sup>ο</sup> σενάριο

Στο παραπάνω διάγραμμα σημειώνεται ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι πολλαπλασιασμένες με  $10^2$ , ώστε να καταστεί εφικτή η σύγκρισή τους χρησιμοποιώντας τον ίδιο άξονα αναφοράς.

Διαπιστώνεται ότι ο Στόλος 1 παρουσιάζει τα βέλτιστα αποτελέσματα και στα τρία κριτήρια, όπως και στο πρώτο σενάριο. Το ίδιο ισχύει και για τα καύσιμα που το LNG είναι το βέλτιστο καύσιμο, καθώς παρουσιάζει τις μικρότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και το μικρότερο εξωτερικό κόστος, ενώ όσον αφορά το κόστος λειτουργίας είναι το δεύτερο οικονομικότερο με μικρή διαφορά από το πρώτο που είναι το HFO. Το HFO παρουσιάζει μικρές εκπομπές CO<sub>2</sub> και μικρό κόστος λειτουργίας, όμως παρουσιάζει σχεδόν το τριπλάσιο εξωτερικό κόστος σε σχέση με το LNG.

Επίσης, διαπιστώνεται ότι στο δεύτερο σενάριο τα Πλοία 2,3 και 4 του Στόλου 1 και το Πλοίο 9 του Στόλου 2 εκτελούν ένα ταξίδι περισσότερο συγκριτικά με το πρώτο σενάριο, γεγονός που οφείλεται στις αυξημένες ταχύτητες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στο δεύτερο σενάριο το Πλοίο 5 του Στόλου 1 να μην χρησιμοποιείται καθόλου και η απαιτούμενη ποσότητα να μεταφέρεται εξολοκλήρου από τα υπόλοιπα 4 πλοία του στόλου. Για τον λόγο αυτό, εκτελούνται 3 ταξίδια λιγότερα στο δεύτερο σενάριο από τον Στόλο 1. Παρ' όλα αυτά, οι τιμές των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, αλλά και του εξωτερικού κόστους και του κόστους

λειτουργίας παρουσιάζονται αυξημένες στο δεύτερο σενάριο, γεγονός που οφείλεται στον αυξημένο συντελεστή φόρτισης των κύριων μηχανών των πλοίων, λόγω αύξησης της ταχύτητας τους, καθώς έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου και συνεπώς όλων των μεγεθών που εξαρτώνται από αυτή.

Όσον αφορά τον Στόλο 2, στο δεύτερο σενάριο χρησιμοποιούνται όλα τα πλοία όπως και στο πρώτο, αλλά εκτελούνται και τα ίδια ταξίδια συνολικά από τον στόλο. Όπως συμβαίνει και με τον Στόλο 1, στον Στόλο 2 οι τιμές των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, αλλά και του εξωτερικού κόστους και του κόστους λειτουργίας παρουσιάζονται αυξημένες στο δεύτερο σενάριο.

### 9.2.5 Ανάλυση των αποτελεσμάτων με βάση τους ισχύοντες κανονισμούς

Στη συνέχεια αναλύονται τα αποτελέσματα του δεύτερου σεναρίου με βάση τους ισχύοντες κανονισμούς που αφορούν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και οξειδίων του αζώτου, όπως περιγράφηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια.

Στους Πίνακες 90 και Πίνακας 91 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά τονομίλι (Δείκτης EEDI) και στους Πίνακας 92 και Πίνακας 93 οι εκπομπές NO<sub>x</sub> ανά κιλοβατώρα για κάθε πλοίο και για τα τρία καύσιμα λειτουργίας, αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν από το υπολογιστικό εργαλείο. Οι πίνακες συνοδεύονται από τα αντίστοιχα διαγράμματα.

#### Δείκτης EEDI – Στόλος 1 [*gr CO<sub>2</sub>/tn · nm*]

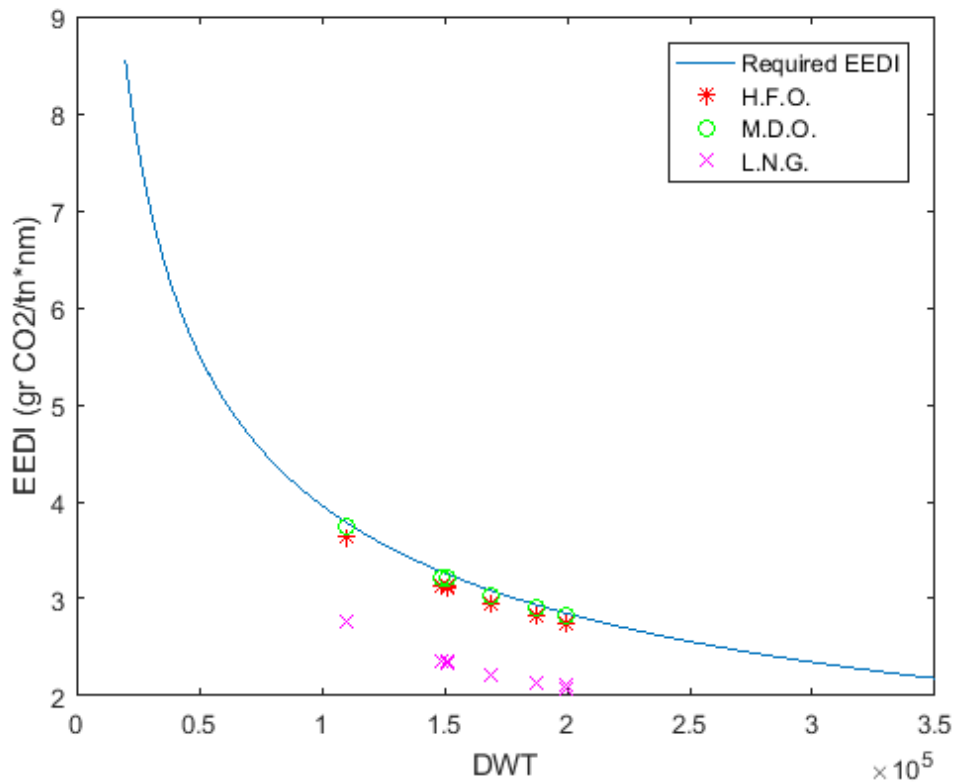
Πλοίο	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5
HFO	2.745	2.740	2.822	3.638	-
MDO	2.826	2.821	2.905	3.739	-
LNG	2.070	2.117	2.126	2.775	-

Πίνακας 90: Εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά τονομίλι 1<sup>ου</sup> στόλου 2<sup>ο</sup> σενάριο

#### Δείκτης EEDI – Στόλος 2 [*gr CO<sub>2</sub>/tn · nm*]

Πλοίο	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10
HFO	2.940	2.940	3.130	3.118	3.129
MDO	3.027	3.027	3.222	3.210	3.222
LNG	2.221	2.221	2.348	2.335	2.350

Πίνακας 91: Εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά τονομίλι 2<sup>ου</sup> στόλου 2<sup>ο</sup> σενάριο



Διάγραμμα 37: Εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά τονομίλι 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> στόλου 2<sup>ο</sup> σενάριο

Διαπιστώνεται ότι οι εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά τονομίλι, όπως προέκυψαν από την μελέτη των δύο στόλων κινούνται εντός των ορίων που θέτει ο IMO, όμως είναι αρκετά αυξημένες σε σύγκριση με το πρώτο σενάριο.

#### Εκπομπές NO<sub>x</sub> ανά κιλοβατώρα - Στόλος 1 [gr/kWh]

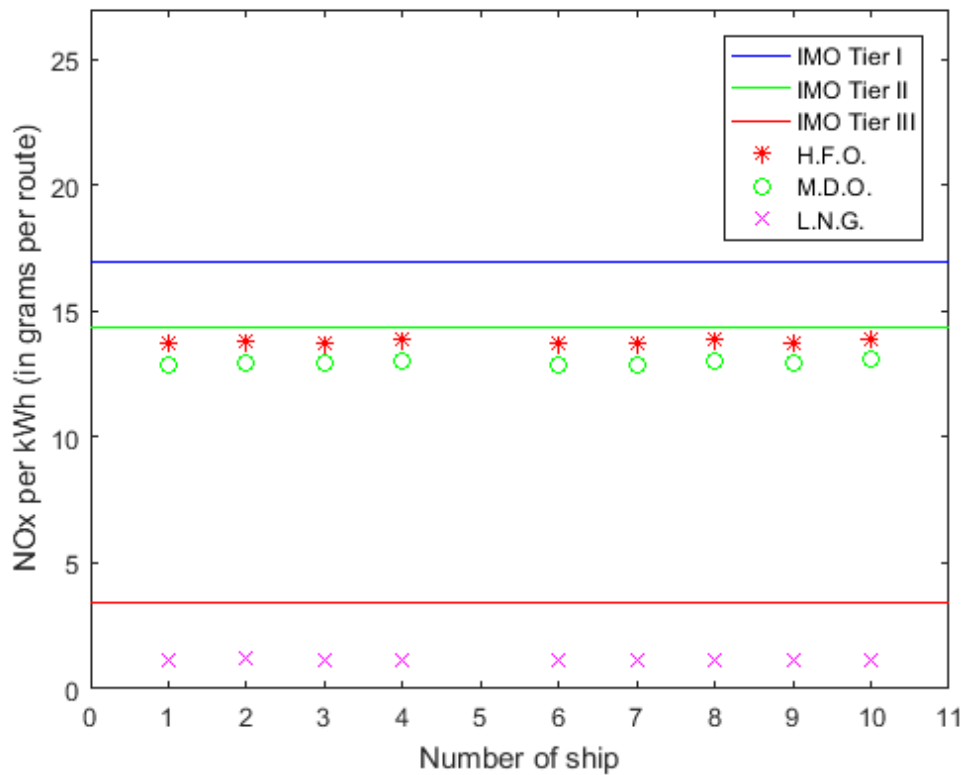
Πλοίο	Πλοίο 1	Πλοίο 2	Πλοίο 3	Πλοίο 4	Πλοίο 5
HFO	13.731	13.817	13.739	13.876	-
MDO	12.907	12.988	12.915	13.043	-
LNG	1.170	1.207	1.170	1.179	-

Πίνακας 92: Εκπομπές NO<sub>x</sub> ανά κιλοβατώρα 1<sup>ου</sup> στόλου 2<sup>ο</sup> σενάριο

#### Εκπομπές NO<sub>x</sub> ανά κιλοβατώρα - Στόλος 2 [gr/kWh]

Πλοίο	Πλοίο 6	Πλοίο 7	Πλοίο 8	Πλοίο 9	Πλοίο 10
HFO	13.719	13.719	13.869	13.749	13.904
MDO	12.895	12.895	13.036	12.924	13.070
LNG	1.170	1.170	1.175	1.163	1.180

Πίνακας 93: Εκπομπές NO<sub>x</sub> ανά κιλοβατώρα 2<sup>ου</sup> στόλου 2<sup>ο</sup> σενάριο



**Διάγραμμα 38:** Εκπομπές NO<sub>x</sub> ανά κιλοβατώρα 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> στόλου 2<sup>ο</sup> σενάριο

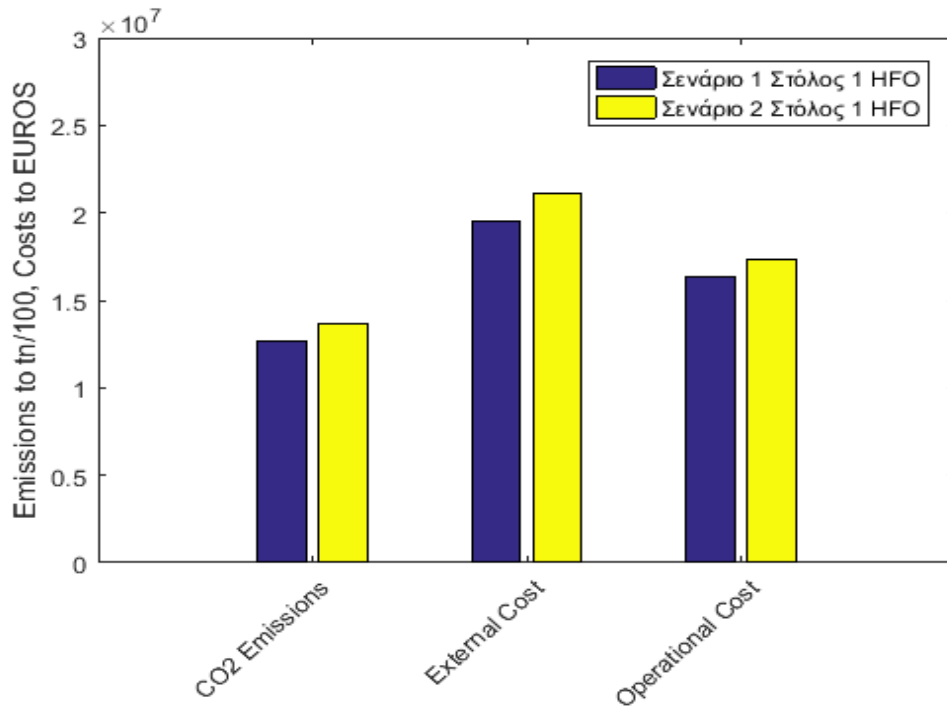
Τα όρια που εμφανίζονται στο παραπάνω διάγραμμα ορίζονται από τον IMO, όπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω, και αφορούν τις αργόστροφες μηχανές ( $n < 130 \text{ rpm}$ ).

Διαπιστώνεται ότι οι εκπομπές NO<sub>x</sub> ανά κιλοβατώρα, όπως προέκυψαν από την μελέτη, κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα με το πρώτο σενάριο. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι στο δεύτερο σενάριο αυξάνονται τόσο οι εκπομπές των οξειδίων του αζώτου όσο και η ισχύς των κύριων μηχανών των πλοίων.

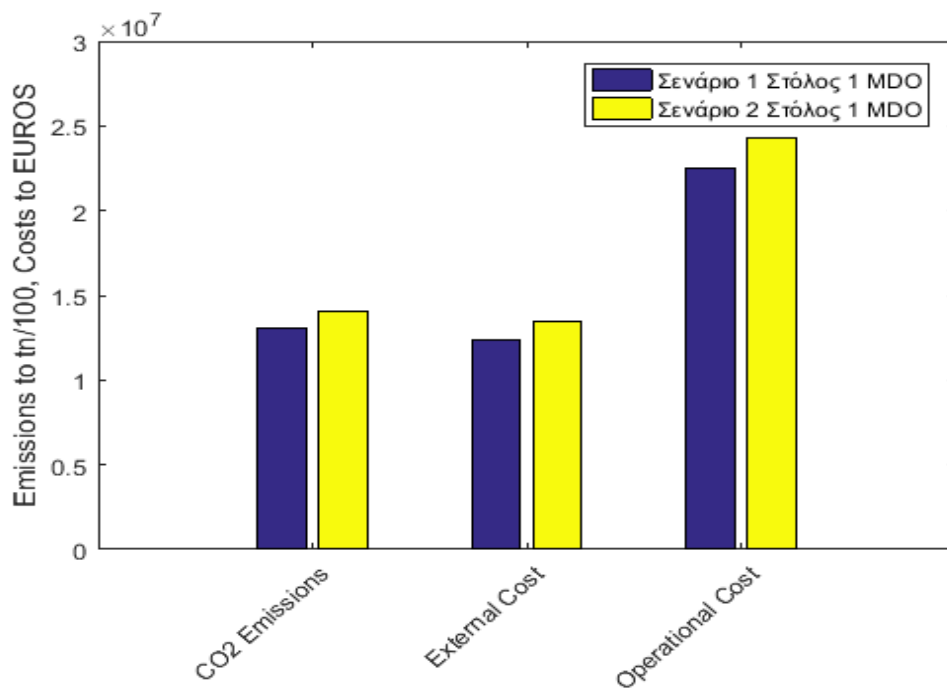
### 9.3 Σύγκριση των δύο σεναρίων ταχυτήτων

Στα Διάγραμμα 39, Διάγραμμα 40, Διάγραμμα 41, Διάγραμμα 42, Διάγραμμα 43 και Διάγραμμα 44 παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα συνολικά δεδομένα για κάθε στόλο για τα δύο σενάρια ταχυτήτων.

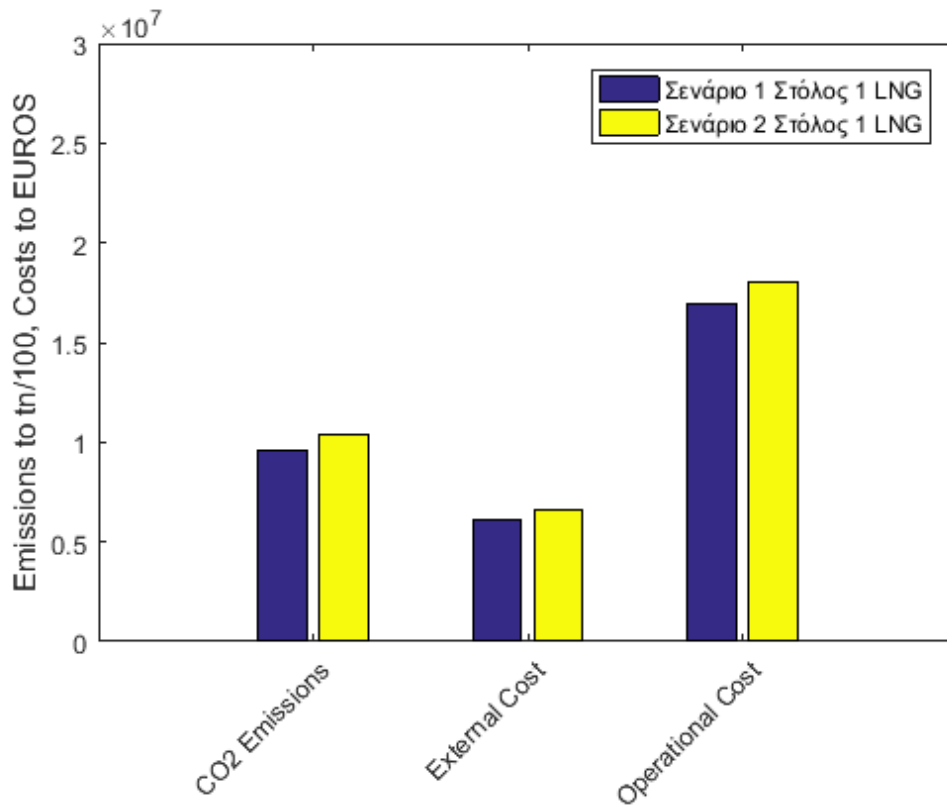




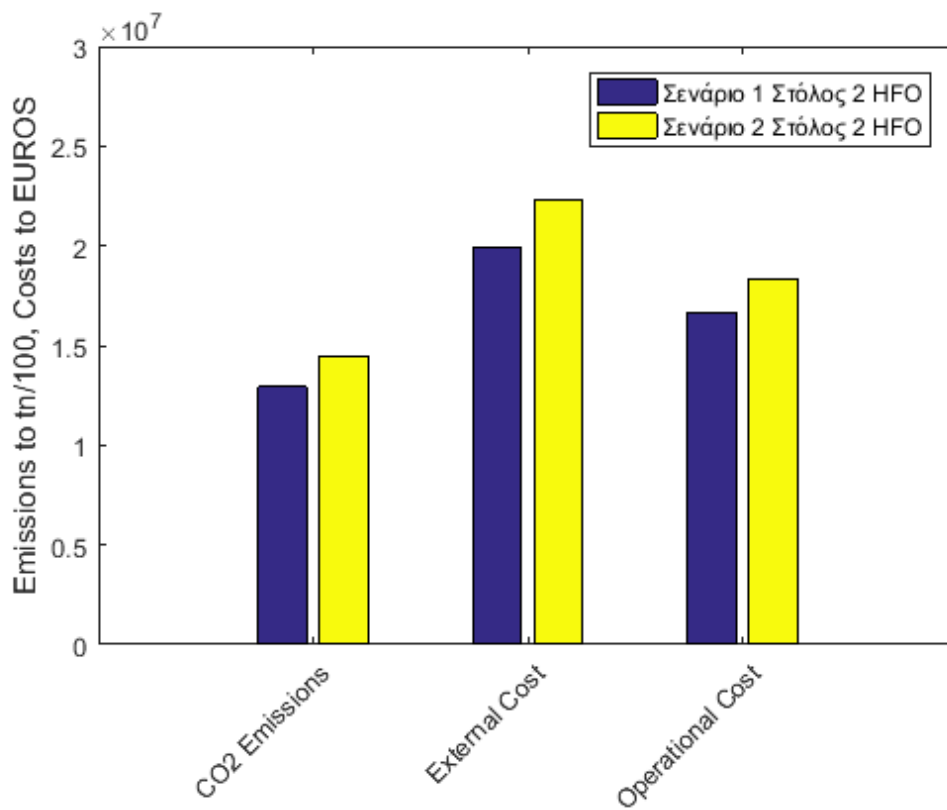
Διάγραμμα 39: Σύγκριση 1<sup>ου</sup> στόλου για το 1<sup>ο</sup> και το 2<sup>ο</sup> σενάριο με καύσιμο HFO



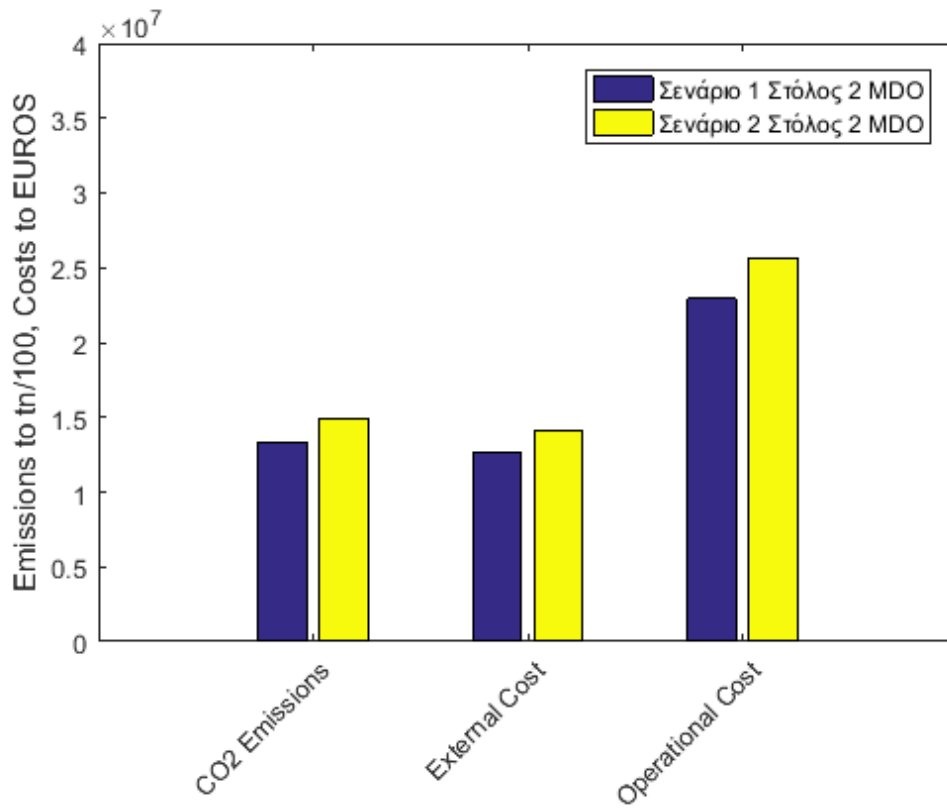
Διάγραμμα 40: Σύγκριση 1<sup>ου</sup> στόλου για το 1<sup>ο</sup> και το 2<sup>ο</sup> σενάριο με καύσιμο MDO



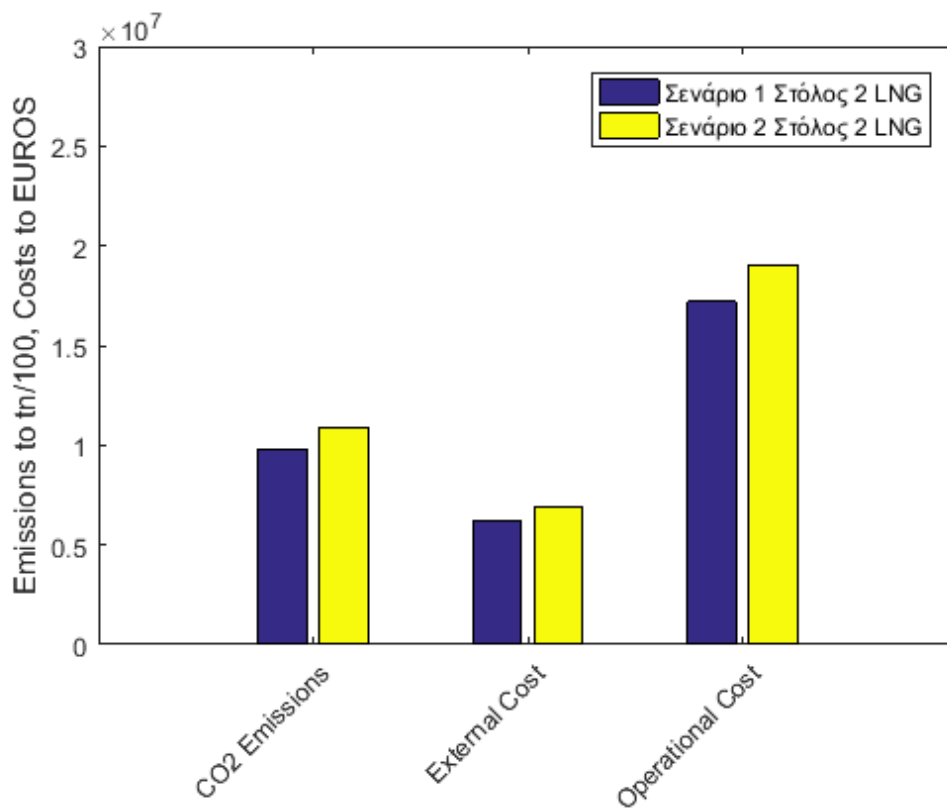
Διάγραμμα 41: Σύγκριση 1<sup>ου</sup> στόλου για το 1<sup>ο</sup> και το 2<sup>ο</sup> σενάριο με καύσιμο LNG



Διάγραμμα 42: Σύγκριση 2<sup>ου</sup> στόλου για το 1<sup>ο</sup> και το 2<sup>ο</sup> σενάριο με καύσιμο HFO



Διάγραμμα 43: Σύγκριση 2<sup>ου</sup> στόλου για το 1<sup>ο</sup> και το 2<sup>ο</sup> σενάριο με καύσιμο MDO



Διάγραμμα 44: Σύγκριση 2<sup>ου</sup> στόλου για το 1<sup>ο</sup> και το 2<sup>ο</sup> σενάριο με καύσιμο LNG

## 10. Μελέτη του κύκλου ζωής

Όπως ήδη αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, προκειμένου να καταγραφεί το οικολογικό αποτύπωμα ενός πλοίου πρέπει να εξεταστούν οι αέριες εκπομπές του, τόσο κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του, όσο και κατά τα άλλα στάδια της ζωής του (κατασκευή, συντήρηση, διάλυση).

Στο παρόν κεφάλαιο, προκειμένου να γίνει μία πλήρης μελέτη για τη ζωή του πλοίου, όσον αφορά τα βασικά μεγέθη που εξετάστηκαν στη παρούσα εργασία (αέριες εκπομπές, εξωτερικό κόστος, κόστος λειτουργίας), γίνεται αναγωγή των αποτελεσμάτων σε χρονική διάρκεια είκοσι ετών, θεωρώντας ότι αυτός είναι ο μέσος όρος ζωής ενός πλοίου Bulk Carrier. Για να καταστεί εφικτή η αναγωγή των αποτελεσμάτων ενός έτους λειτουργίας σε ορίζοντα είκοσι ετών, γίνεται η παραδοχή ότι τα πλοία των στόλων κινούνται στην ίδια αγορά ικανοποιώντας την ίδια απαίτηση μεταφερόμενου φορτίου σε όλο τον κύκλο ζωής τους. Όπως γίνεται κατανοητό, κάτι τέτοιο είναι λιγότερο πιθανό να συμβεί, καθώς σπάνια τα πλοία ικανοποιούν μόνο μία αγορά, ενώ επιπλέον υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν τις συνθήκες λειτουργίας τους (κατάσταση θάλασσας, κυματισμοί, άνεμοι κ.λπ.).

Για τη μελέτη του κύκλου ζωής τους, επιλέχθηκαν τρεις συνδυασμοί πλοίων, ο πρώτος είναι ο βέλτιστος συνδυασμός του πρώτου σεναρίου (Στόλος 1 με καύσιμο LNG), ο δεύτερος είναι ο βέλτιστος συνδυασμός του δεύτερου σεναρίου (Στόλος 1 με καύσιμο LNG) και ο τρίτος είναι ο χειρότερος συνδυασμός που προέκυψε και από τα δύο σενάρια (Στόλος 2 με καύσιμο MDO, Σενάριο 2).

Επιπλέον, για την μελέτη των αέριων εκπομπών και του εξωτερικού κόστους σε όλο τον κύκλο ζωής των πλοίων των συνδυασμών χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα του προγράμματος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής εργασίας και αφορούν στις αέριες εκπομπές των πλοίων σε όλα τα στάδια της μεταλλικής κατασκευής (κατασκευή, συντήρηση, απόσυρση) και της μηχανολογικής εγκατάστασης (κατασκευή, δοκιμές σε εργοστασιακό και θαλάσσιο περιβάλλον). Επιπλέον, για τον υπολογισμό του εξωτερικού κόστους έχει γίνει η θεώρηση ότι όλα τα παραπάνω στάδια έγιναν σε παραθαλάσσια περιοχή του Βόρειου-Δυτικού Ατλαντικού Ωκεανού.

Τέλος, εξαιτίας της έλλειψης στοιχείων, η μελέτη του κόστους των πλοίων στον κύκλο ζωής τους περιορίστηκε στο κόστος λειτουργίας (κόστος καυσίμων) και στο κόστος συντήρησης. Σύμφωνα με τον Storfjord (2009), για ένα πλοίο Bulk Carrier Capesize ηλικίας δέκα ετών, το κόστος των καυσίμων του αποτελούν το 18.8% του συνολικού κόστους κατά την διάρκεια ενός έτους λειτουργίας του, ενώ το κόστος

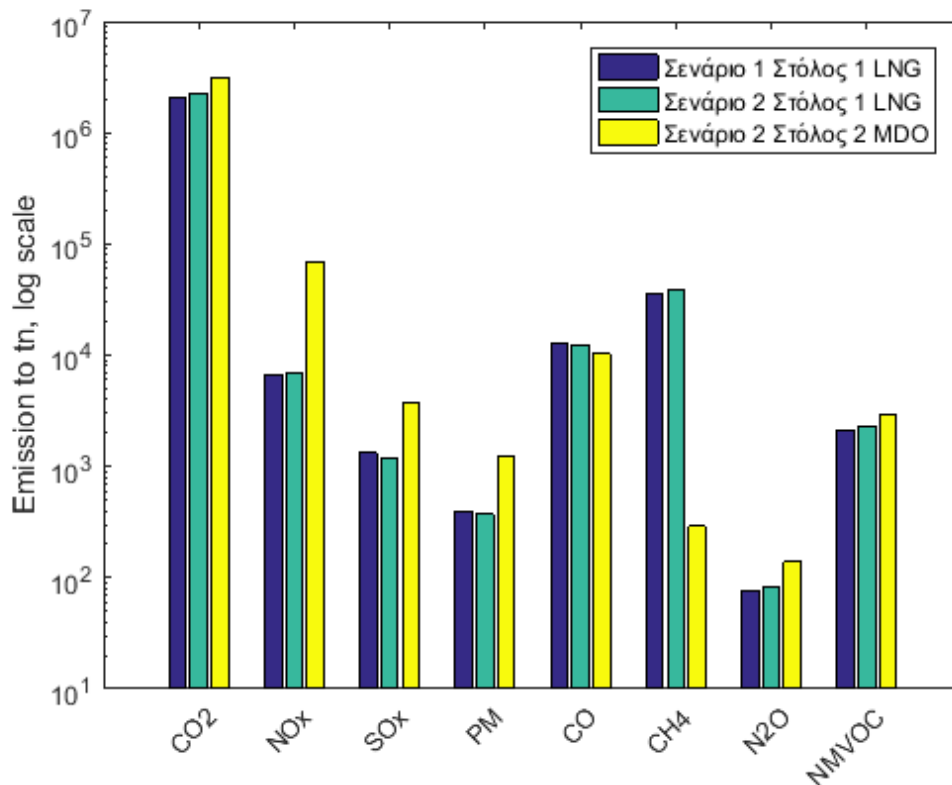
συντήρησης αποτελεί το 2.1%. Χρησιμοποιώντας την αναλογία αυτή υπολογίσθηκε το κόστος συντήρησης των πλοίων για ένα έτος λειτουργίας.

Στον Πίνακα 94, παρουσιάζονται οι συνολικές αέριες εκπομπές για τον κύκλο ζωής των συνδυασμών και ακολουθεί το αντίστοιχο διάγραμμα.

#### Συνολικές αέριες εκπομπές για τον κύκλο ζωής των συνδυασμών [tn]

Συνδυασμός	Στόλος 1 LNG	Στόλος 1 LNG	Στόλος 2 MDO
	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 2
CO <sub>2</sub>	2104182	2243816	3171389
NO <sub>x</sub>	6736	7046	69763
SO <sub>x</sub>	1327	1173	3800
PM	394	372	1220
CO	12951	12525	10259
CH <sub>4</sub>	36024	38998	289
N <sub>2</sub> O	77	84	140
NMVOG	2120	2295	2874

Πίνακας 94: Συνολικές αέριες εκπομπές για τον κύκλο ζωής των συνδυασμών



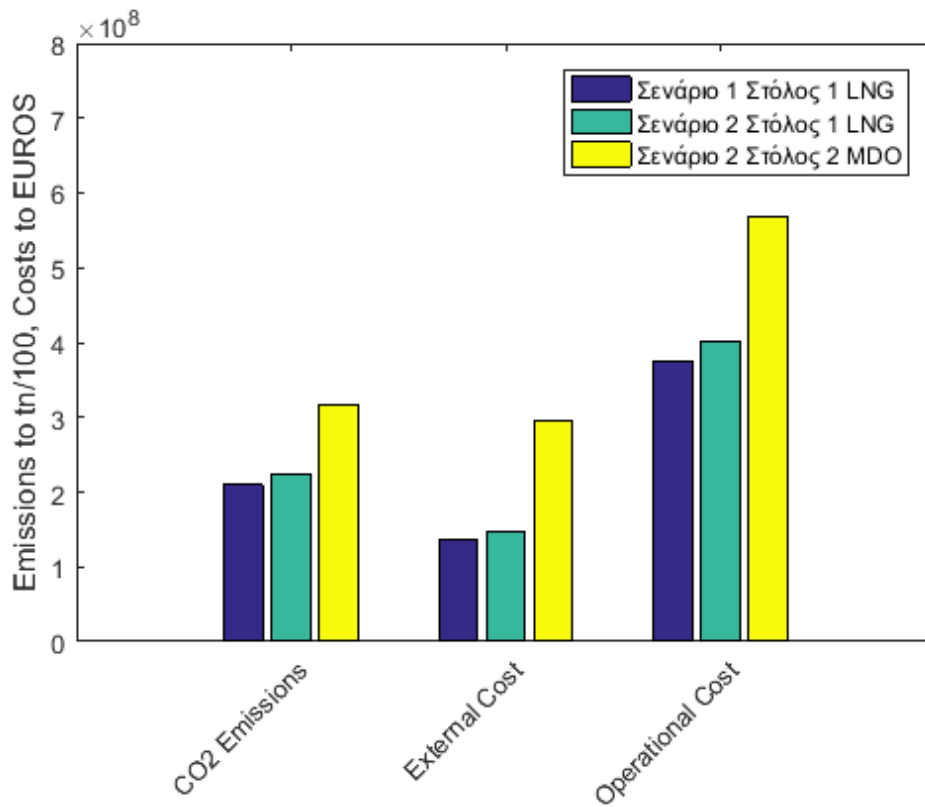
Διάγραμμα 45: Συνολικές αέριες εκπομπές για τον κύκλο ζωής των συνδυασμών

Στον Πίνακα 95, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα συνολικά για τον κύκλο ζωής των τριών συνδυασμών και ακολουθεί και το αντίστοιχο διάγραμμα.

### Αποτελέσματα Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Συνδυασμός	Στόλος 1 LNG Σενάριο 1	Στόλος 1 LNG Σενάριο 2	Στόλος 2 MDO Σενάριο 2	
Εκπομπές CO <sub>2</sub>	2104182	2243816	3171389	<i>tn</i>
Εξωτερικό κόστος	137459126	27478941	296290004	<i>EUROS</i>
Κόστος λειτουργίας	401836699	44059492	608586820	<i>EUROS</i>

Πίνακας 95: Αποτελέσματα Ανάλυσης Κύκλου Ζωής



Διάγραμμα 46: Αποτελέσματα Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Στο παραπάνω διάγραμμα σημειώνεται ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι πολλαπλασιασμένες με  $10^2$ , ώστε να καταστεί εφικτή η σύγκρισή, τους χρησιμοποιώντας τον ίδιο άξονα αναφοράς.

# 11. Συμπεράσματα

---

Στόχος της παρούσας εργασίας υπήρξε η ανάπτυξη ενός υπολογιστικού εργαλείου που υπολογίζει το εξωτερικό κόστος και το κόστος λειτουργίας ενός στόλου αποτελούμενου από φορτηγά πλοία τύπου Bulk Carrier και να εντοπίζει τον βέλτιστο συνδυασμό πλοίων του στόλου. Η μελέτη εστιάζει στη χρήση στόλων που απαιτούνται για την κάλυψη των αναγκών μιας συγκεκριμένης διαδρομής για ένα έτος λειτουργίας, ενώ παράλληλα ελέγχονται και άλλα συναφή μεγέθη που σχετίζονται με τους ισχύοντες κανονισμούς. Για την επίτευξη του στόχου αυτού χρησιμοποιήθηκε το προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB, ώστε να αναπτυχθεί ένα πλήρως διαδραστικό εργαλείο, το οποίο μέσω κατάλληλα διαμορφωμένων πλαισίων διαλόγου στην Αγγλική γλώσσα αλληλεπιδρά με τον χρήστη ζητώντας τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου.

Το πρόγραμμα ως αποτελέσματα εμφανίζει τον βέλτιστο συνδυασμό των πλοίων του στόλου και γενικά δεδομένα που αφορούν στη χρήση του, όπως τα ταξίδια, οι εκπομπές, το εξωτερικό κόστος και το κόστος λειτουργίας τόσο για κάθε πλοίο, όσο και συνολικά για τον εκάστοτε συνδυασμό. Στην συνέχεια, παράγει αποτελέσματα που σχετίζονται με τους ισχύοντες κανονισμούς, όπως είναι τα δεδομένα που απαιτείται να καταγράφονται σύμφωνα με τον Κανονισμό (ΕΥ) 2015/757 της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Κανονισμός Παρακολούθησης – Αναφοράς – Πιστοποίησης/ *Monitoring – Reporting – Verification, MRV*), οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) ανά τονομίλι και οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) ανά κιλοβατώρα. Σημειώνεται ότι για τα δύο τελευταία μεγέθη το πρόγραμμα σχεδιάζει διαγράμματα, στα οποία εμφανίζονται και τα αντίστοιχα όρια όπως έχουν διαμορφωθεί από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (International Maritime Organization, *IMO*).

Προκειμένου να εξεταστεί η σωστή λειτουργία του προγράμματος, επιλέχθηκε η εφαρμογή του σε δύο στόλους Bulk Carrier Capesize, των οποίων τα χαρακτηριστικά αντλήθηκαν από βάσεις δεδομένων. Ο πρώτος στόλος αποτελούταν από πέντε πλοία με μεγάλο εύρος DWT, ενώ ο δεύτερος από πέντε πλοία με κοντινό DWT. Για τη λειτουργία των στόλων επιλέχθηκε η αγορά Αυστραλίας – Κίνας και η μεταφορά 6500000 *tn* κάρβουνου. Για τα παραπάνω δεδομένα εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικά σενάρια ταχυτήτων, στο πρώτο εκ των οποίων όλα τα πλοία κινούνται με ταχύτητα 11.5 κόμβων που είναι η μέση τιμή των ταχυτήτων για την συγκεκριμένη διαδρομή σύμφωνα με στοιχεία που συλλέχθηκαν από διαδικτυακή βάση δεδομένων, ενώ στο δεύτερο σενάριο τα πλοία κινούνται με αυξημένες ταχύτητες. Τέλος επιλέχθηκαν τρία είδη καυσίμων λειτουργίας (HFO, MDO, LNG).

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του πρώτου σεναρίου, όπου όλα τα πλοία κινούνται με ταχύτητα 11.5 κόμβων και τη σύγκρισή τους για τους δύο στόλους, προκύπτει ότι ο πρώτος στόλος καλύπτει τη ζήτηση εκτελώντας ένα λιγότερο ταξίδι από τον δεύτερο, ενώ παράλληλα παρουσιάζει τις λιγότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και το μικρότερο εξωτερικό κόστος και κόστος λειτουργίας, ανεξαρτήτως καυσίμου. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων για τα τρία καύσιμα λειτουργίας προκύπτει ότι το LNG δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα, ανεξαρτήτως του στόλου, καθώς παρουσιάζει πολύ λιγότερες αέριες εκπομπές (με εξαίρεση τις εκπομπές μεθανίου), εξαιρετικά μικρό εξωτερικό κόστος και κόστος λειτουργίας ελάχιστα μεγαλύτερο από αυτό του HFO. Σημειώνεται ότι η τιμή του LNG είναι σε αυξημένα επίπεδα, γεγονός το οποίο οφείλεται στο ότι είναι λίγα τα σημεία ανεφοδιασμού του. Αυτό αναμένεται να αλλάξει στο μέλλον, καθώς όλο και περισσότερα πλοία θα χρησιμοποιούν το LNG ως καύσιμο.

Τα αποτελέσματα για το δεύτερο σενάριο, όπου οι ταχύτητες των πλοίων είναι αυξημένες και διαφορετικές για κάθε ένα από αυτά, παρατηρείται ότι, παρά τις αλλαγές στις συνθέσεις των στόλων και το διαφορετικό αριθμό ταξιδιών, τα αποτελέσματα παραμένουν αντίστοιχα με το πρώτο σενάριο. Δηλαδή, αφ' ενός ο πρώτος στόλος εμφανίζει τα μικρότερα αποτελέσματα όσον αφορά τα εξεταζόμενα μεγέθη (εκπομπές CO<sub>2</sub>, εξωτερικό κόστος και κόστος λειτουργίας) ανεξαρτήτως καυσίμου και αφ' ετέρου το LNG εμφανίζεται ως το βέλτιστο καύσιμο.

Σημειώνεται ότι, στον βέλτιστο συνδυασμό του πρώτου στόλου στο δεύτερο σενάριο ταχυτήτων χρησιμοποιείται ένα πλοίο λιγότερο από ότι στο πρώτο σενάριο, για την ικανοποίηση της μεταφοράς της ίδιας ποσότητας φορτίου.

Συγκρίνοντας τα βασικά αποτελέσματα των δύο σεναρίων ταχυτήτων, δηλαδή τις αέριες εκπομπές, το εξωτερικό κόστος και το κόστος λειτουργίας, αυτά είναι εμφανώς μικρότερα στο πρώτο σενάριο. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι ο βέλτιστος συνδυασμός είναι αυτός του Στόλου 1 στο σενάριο των μειωμένων ταχυτήτων καθώς η αύξηση των ταχυτήτων οδηγεί σε αύξηση των υπό εξέταση μεγεθών. Από την άλλη πλευρά όμως, η αύξηση των ταχυτήτων οδηγεί στη χρήση ενός λιγότερου πλοίου, γεγονός που δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο.

Όσον αφορά τους ισχύοντες κανονισμούς, παρατηρείται ότι ικανοποιούνται από όλα τα πλοία και στα δύο σενάρια, ανεξαρτήτως καυσίμου. Όμως, στο δεύτερο σενάριο οι εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά τονομίλι παρουσιάζονται αρκετά αυξημένες. Το γεγονός αυτό συμβαίνει καθώς, αυξάνοντας την ταχύτητα των πλοίων αυξάνεται ο συντελεστής φόρτισης των κύριων μηχανών, επομένως και η κατανάλωση καυσίμου και οι εκπομπές CO<sub>2</sub>. Από την άλλη πλευρά, οι εκπομπές NO<sub>x</sub> ανά κιλοβατώρα εμφανίζονται στα ίδια επίπεδα και στα δύο σενάρια, καθότι ενώ αυξάνονται οι εκπομπές NO<sub>x</sub> για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, ταυτόχρονα αυξάνεται και η ισχύς που παράγεται από τις κύριες μηχανές.



Από την ανάλυση του κύκλου ζωής όπου μελετήθηκαν τρεις συνδυασμοί (Στόλος 1 LNG Σενάριο 1, Στόλος 1 LNG Σενάριο 2, Στόλος 2 MDO Σενάριο 2) παρατηρείται ότι οι δύο πρώτοι παρουσιάζουν λιγότερες εκπομπές σε σχέση με τον τρίτο, με εξαίρεση τις εκπομπές CH<sub>4</sub>. Αυτό οφείλεται στη μεγάλη περιεκτικότητα του LNG σε μεθάνιο, η οποία αγγίζει το 94-95% της σύστασής του. Τέλος, όσον αφορά το εξωτερικό κόστος και το κόστος λειτουργίας, οι δύο πρώτοι συνδυασμοί παρουσιάζουν πολύ μικρότερα αποτελέσματα.

## 12. 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 μεγαλύτερους στόλους και σε διαφορετικούς τύπους πλοίων (Container, Tanker κ.λπ.).
- Τροποποίηση του υπολογιστικού εργαλείου ώστε τα δεδομένα εισόδου να αντλούνται απευθείας από βάσεις δεδομένων, αντί να καταχωρούνται από τον χρήστη.
- Ανάπτυξη του υπολογιστικού εργαλείου ώστε να αποκτήσει αυτονομία στον υπολογισμό των αέριων εκπομπών των πλοίων, αντί να τις δέχεται ως δεδομένα εισόδου.
- Επέκταση του υπολογιστικού εργαλείου ώστε να έχει τη δυνατότητα εξέτασης και βελτιστοποίησης σεναρίων διακίνησης διαφορετικών ειδών ξηρών φορτίων χύδην (dry bulk) από έναν ή περισσότερους στόλους πλοίων.
- Επέκταση του υπολογιστικού εργαλείου ώστε να έχει τη δυνατότητα εξέτασης και βελτιστοποίησης σεναρίων διακίνησης ξηρού φορτίου χύδην σε δίκτυο λιμένων, λαμβάνοντας υπόψη τυχόν περιορισμούς στις θαλάσσιες διαδρομές διασύνδεσής τους (π.χ. διάπλους διωρύγων, είσοδος σε Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών, πλεύση μέσω αρκτικής ζώνης κ.λπ.)

## 13. 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.
- Blanco-Davis, E. and Zhou, P. (2016). *Life Cycle Assessment as a complementary utility to regulatory measures of shipping energy efficiency*. Ocean Engineering, December 2016, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.10.015
- Brander, M. (2012). *Greenhouse Gases, CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>e, and Carbon: What Do All These Terms Mean*. Ecometrica
- CE Delft, (2011). *External Costs of Transport in Europe. Update Study for 2008*. Delft, CE Delft.
- 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.
- Chatzinikolaou, S., Oikonomou, S., and Ventikos, N. P. (2015). *Health Externalities of Ship Air Pollution at Port-Piraeus Port Case Study*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, Elsevier Series.
- Chen, D., Wang, X., Nelson, P., Li, Y., Zhao, N., Zhao, Y., Lang, J., Zhou, Y., Guo, X. (2017). *Ship emission inventory and its impact on the PM<sub>2.5</sub> air pollution in Qingdao Port, North China*. Atmospheric Environment 166(2017):351-361
- ClassNK, (2017). *Requirements of EU MRV Regulations and Challenges of Shipping Companies*. EEDI Department, ClassNK, Tokyo
- Corbett, J.J., Winebrake, J. (2008). *The Impacts of globalization on international maritime transport activity*. Global forum on transport and environment in a globalizing world, 10-12 November 2008. Guadalajara, Mexico.
- 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
- Corbett, J.J., Koehler, H.W. (2003). *Updated emissions from ocean shipping*. Journal of Geophysical Research 108 (D20)

- Daskalakis, I., Chatzinikolaou, S., Ventikos, N.P. (2015). *Platform for assessing ship emissions from a life cycle perspective*. Technologies, Operations, Logistics and Policies towards meeting 2050 emission targets (SCC 2015), Glasgow, UK, Osmanet al. (eds), Vol. 1, pp. 113-122
- EEA, (2012c). *Particulate matter from natural sources and related reporting under the EU Air Quality Directive in 2008 and 2009*. EEA Technical report No. 10/2012. European Environmental Agency
- EEA, (2014). *Costs of air pollution from European industrial facilities 2008-2012*. EEA Technical report No 20/2014. European Environmental Agency
- Endresen, O., Sorgard, E., Behrens, H.L., Brett, P.O., Isaksen, I.S.A. (2007). *Ahistorical reconstruction of ship's fuel consumption and emissions*. Journal of Geophysical Research 112 (D12301)
- Entec, (2005). *Service contract on ship emissions: assignment, abatement and market-based instruments*. Task 1-Preliminary assignment of ship emissions to European Countries. Final Report. European Commission Directorate General Environment. Contract n. 070501/2004/383959/MAR/C1.
- European Maritime Safety Agency EMSA, (2017). *Guidance on LNG Bunkering to Port Authorities and Administrations*. EMSA
- ExternE, (2005). *EXTERNE: Externalities of Energy: Methodology 2005 Update*. European Commission, Brussels (ISBN 92-79-00423-9).
- Eyring, V., Koehler, H.W., van Aardenne, J., Lauer, A. (2005). *Emissions from international shipping: 1. The last 50 years*. Journal of Geophysical Research 110 (D17305)
- Georgakaki, A., Coffey, R.A., Lock, G., Sorenson, S.C. (2005). *Transport and Environment Database System (TRENDS): Maritime air pollutant emission modeling*. Atmospheric Environment 39(2005):2357-2365.
- Greiner, S. (2013). *Ship operating costs: Current and future trends*. Moore Stephens, December 2013.
- Guinée, J., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., Rydberg, T. (2011). *Life cycle assessment: past, present, and future*. Environ. Sci. Technol. 45 (1), 90–96.
- Hakulinen, M. (2015). *Bulk carrier economics: the impact of design*. Bachelor of engineering, thesis. Helsinki Metropolia University of Applied Sciences, Industrial Management and Engineering.

- Hunter, K., Liss, P., Surapipith, V., Dentener, F., Duce, R., Kanakidou, M., Kubilay, N., Mahowald, N., Okin, G., Sarin, M., Uematsu, M., Zhu, T. (2011). *Impacts of anthropogenic SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> and NH<sub>3</sub> on acidification of coastal water and shipping lanes*. Geophysical Research Letters. DOI:10.1029/2011GL047720
- International Maritime Organisation, IMO, (2014). *Reduction of GHG emissions from ships*. Third IMO GHG Study 2014, Final Report.
- International Maritime Organisation, IMO, (2016). *Module 2- Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines*. London, UK
- International Maritime Organization IMO, (2009). *Second IMO GHG Study 2009, Prevention of Air Pollution from Ships*. London, UK. April 2009; Buhaug, Ø., Corbett, J.J., Endresen, Ø., Eyring, V., Faber, J., Hanayama, S., Lee, D.S., Lee, D., Lindstad, H., Markowska, A.Z., Mjelde, A., Nelissen, D., Nilsen, J., Pålsson, C., Winebrake, J.J., Wu, W., Yoshida, K.
- 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.
- IPCC, (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment*. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976pp
- Laurent, A., Hauschild, M. (2013). *Impacts of NMVOC emissions on human health in European countries for 2000-2010: Use of sector-specific substance profiles*. Atmospheric Environment 85(2014):247-255
- Lloyd's Register, (2016). *Monitoring, reporting and verification of CO<sub>2</sub> emissions from ships*. TI ΑΛΛΟ?
- Matthias, V., Bewersdorff, I., Aulinger, A., Quante, M. (2010). *The contribution of ship emissions to air pollution in the North Sea regions*. Environmental Pollution 158(2010):2241-2250
- Miola, A., Paccagnan, V., Mannino, I., Massaruto, A., Perujo, A., Turvani, M. (2009). *External Costs of Transportation Case study: Maritime Transport*. ISBN 978-92-79-12534-8 EU-Report, Luxembourg.
- Miola, A., Ciuffo, B. (2011). *Estimating air emissions from ships: Meta-analysis of modeling approaches and available data sources*. Atmospheric Environment 45(2011):2242-2251

- Nash, C. with contribution from partners (2003). *UNITE: UNification of accounts and marginal costs of Transport Efficiency. Final report for Publication*. ITS, University of Leeds
- National Cooperative Freight Research Program, NCFRP, (2010). *Representing freight in Air Quality and Greenhouse Gas Models*. Report 4.
- Panagiotopoulou, S. (2016). *Environmental Life Cycle Cost analysis of vessel's main engine*. Diploma thesis. National Technical University of Athens, School of Naval Architecture & Marine Engineering. Athens, Greece
- Papanastasiou, D.K., Melas, D. (2009). *Climatology and impact on air quality of sea breeze in an urban coastal environment*. International Journal of Climatology
- Raub, J., Mathieu-Nolf, M., Hampson, N., Thom, S. (1999). *Carbon monoxide poisoning – a public health perspective*. Toxicology 145(2000):1-14
- Ricardo-AEA, (2014). *Update of the Handbook on External Costs of Transport. Final Report*. Report for the European Commission. Ricardo-AEA/R/ED57769
- RS Platou ASA (2015). *The Platou report 2015*.
- Skjølvsvik, K.O., Andersen, A.B., Corbett, J.J., Skjelvik, J.M. (2000). *Study of greenhouse gas emissions from ships*. Report to International Maritime Organization on the outcome of the IMO on Greenhouse Gas Emissions from Ships. MEPC 45/8, MARINTEK Sintef Group/Carnegie Mellon Univ., Center for Economic Analysis/Det Norkse Veritas, Trondheim, Norway
- Stopford, M. (1997). *Maritime economics*. Second edition.
- Stopford, M. (2009). *Maritime economics*. Third edition.
- The Helmepea Navigator. (2014). *Εφαρμογή του Παραρτήματος VI της MARPOL – Εξελίξεις στην MEPC 66*. Τεχνικό Δελτίο, 112. Απρίλιος 2014.
- Tzannatos, E. (2009). *Ship emissions and their externalities for the port of Piraeus Greece*. Atmospheric Environment, 44, 400-407.
- Tzannatos, E. (2010). *Ship emissions and their externalities for Greece*. Atmospheric Environment 44(2010):2194-2202
- U.S. Department of Energy, (2017). *Energy CO<sub>2</sub> emissions impact of clean energy technology innovation and policy*. U.S. Department of Energy's Office of Energy Policy and Systems Analysis

- U.S. Environmental Protection Agency EPA, (2008). *EPA's 2008 Report on the Environment*. National Center for Environmental Assessment, Washington, DC; EPA/600/R-07/045F
- United Nations Conference on Trade and Development UNCTAD, (2018). *Review of maritime transport*. ISBN 978-92-1-112922-9
- Wang, C., Corbett, J.J., Firestone, J. (2008). *Improving spatial representation of global ship emissions inventories*. Environmental Science & Technology
- Whall, C., Cooper, D., Archer, K., Twigger, L., Thurston, N., Ockwell, D., Mclyntre, A., Ritchie, A. (2002). *Quantification of Emissions from Ships Associated with Ship Movements between Ports in the European Community*. Report for the European Commission. Entec UK Limited, Great Britain.
- World Health Organization WHO, (2008). *Health risks of ozone from long-range transboundary air pollution*. World Health Organization Europe. ISBN 978-92-890-42895
- Δασκαλάκης, Ι. (2015). *Λειτουργικός υπολογισμός αέριων εκπομπών στον κύκλο ζωής πλοίων: Ανάπτυξη υπολογιστικού προγράμματος*. Διπλωματική διατριβή. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών. Αθήνα, Ελλάδα
- Μαντάκος, Ν. (2012). *Αξιολόγηση του κύκλου ζωής της μηχανολογικής εγκατάστασης πλοίων*. 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.

## Σχετικοί ιστότοποι

- «<https://utslappisiffror.naturvardsverket.se/en/Substances/Other-gases/Non-methane-volatile-organic-compounds/>» Swedish environmental protection agency, (2016). (assessed on 2017)
- «<https://utslappisiffror.naturvardsverket.se/en/Substances/Greenhouse-gases/Nitrous-oxide/>» Swedish environmental protection agency, (2016). (assessed on 2017)

«<http://utslappisiffror.naturvardsverket.se/en/Substances/Greenhouse-gases/Methane/>» Swedish environmental protection agency, (2016).  
(assessed on 2017)

«<https://ourworldindata.org/oil-spills>» (assessed on 2018)

«<https://shipandbunker.com/prices/apac>» (assessed on 2018)

«[www.marinetraffic.com](http://www.marinetraffic.com)» (assessed on 2018)

«<https://lca-net.com/projects/show/calcas/>» (assessed on 2018)