



ΔΙΠΛΩΜΑ

Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία

«Διερεύνηση και αξιολόγηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης στη ναυτιλία»

Όνοματεπώνυμο: Ανδρέας Κασιμάτης
Αριθμός Μητρώου: ΜΝΣΝΔ21022

Διπλωματική Εργασία,

που υποβλήθηκε στο Τμήμα Ναυτιλιακών Σπουδών του Πανεπιστημίου Πειραιώς και στο Τμήμα
Ναυτικών Επιστημών της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων ως μέρος των απαιτήσεων για την απόκτηση του
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στη «Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία»

UNIVERSITY OF PIRAEUS
DEPARTMENT OF MARITIME STUDIES



HELLENIC NAVAL ACADEMY
DEPARTMENT OF MARINE SCIENCE



Master of Science
in
Marine Science and Technology Management

**«Investigation and critical assessment of energy
efficiency indicators in shipping industry»**

Full Name: Andreas Kasimatis
Registration Number: MNΣNΔ21022

A Dissertation,

submitted to the Department of Maritime Studies of University of Piraeus and to the Department of
Marine Science of Hellenic Naval Academy in partial fulfilment of the requirements for the Degree of
Master of Science in «Marine Science and Technology Management»

Piraeus, April 2023

ΔΗΛΩΣΗ ΑΥΘΕΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ / ΖΗΤΗΜΑΤΑ COPYRIGHT

Το άτομο το οποίο εκπονεί την Διπλωματική Εργασία φέρει ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στην βάση των εξής παραγόντων: του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης (εμπορικός, μη κερδοσκοπικός ή εκπαιδευτικός), της φύσης του υλικού, που χρησιμοποιεί (τμήμα του κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες ή χάρτες), του ποσοστού και της σημαντικότητας του τμήματος, που χρησιμοποιεί σε σχέση με το όλο κείμενο υπό copyright, και των πιθανών συνεπειών της χρήσης αυτής στην αγορά ή στη γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εγκρίθηκε ομόφωνα από την Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή που ορίστηκε από τη ΕΔιΕ του ΔΠΜΣ σύμφωνα με τον Κανονισμό Λειτουργίας του ΔΠΜΣ «Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία».

ΜΕΛΟΣ Α΄: Δρ. Παριώτης Ευθύμιος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΣΝΔ (Επιβλέπων)

ΜΕΛΟΣ Β΄: Δρ. Ζάννης Θεόδωρος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΣΝΔ

ΜΕΛΟΣ Γ΄: Δρ. Κατσάνης Ιωάννης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΣΝΔ



Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας Δρ. Ευθύμιο Παριώτη για την επιστημονική καθοδήγηση, τις συμβουλές, τις υποδείξεις και τη συνεχή υποστήριξη του κατά τη διάρκεια συγγραφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τους υπόλοιπους καθηγητές του μεταπτυχιακού προγράμματος «Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία» για τις πολύτιμες γνώσεις που μας πρόσφεραν γύρω από τον τομέα της ναυτιλίας.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τόσο τους φίλους όσο και την οικογένεια μου που με στηρίζουν και με ενθαρρύνουν όλα αυτά τα χρόνια.



Περίληψη

Ο κλάδος της ναυτιλίας παίζει καθοριστικό ρόλο τόσο στο παγκόσμιο εμπόριο όσο και στη μεταφορά, έχοντας σημαντικό μερίδιο στην ενεργειακή κατανάλωση και στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Έτσι, η ενεργειακή απόδοση κρίνεται σημαντική για τη ναυτιλία αφού μπορεί να μειώσει το περιβαλλοντικό αντίκτυπο και να αυξήσει την ανταγωνιστικότητα της. Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή διερευνά και αξιολογεί τους δείκτες ενεργειακής απόδοσης που χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία προκειμένου να αναγνωρίσει τα δυνατά και τα αδύναμα σημεία τους.

Η έρευνα για αυτή τη μελέτη στηρίχτηκε σε ανασκόπηση των ήδη υπαρχόντων δεικτών ενεργειακής απόδοσης στη ναυτιλία. Για την αποτελεσματικότερη μελέτη τους, πραγματοποιήθηκε ένας διαχωρισμός σε συνολικούς και επιμέρους δείκτες, με τους δεύτερους να αναφέρονται σε συγκεκριμένα συστήματα του πλοίου.

Τα ευρήματα αυτής της μελέτης έδειξαν πως οι δείκτες ενεργειακής απόδοσης στη ναυτιλία ποικίλουν ανάλογα με το σκοπό που εξυπηρετούν. Χρησιμοποιώντας κριτική αξιολόγηση, πραγματοποιείται η ανάλυση των δεικτών η οποία στηρίζεται σε κριτήρια όπως είναι η αξιοπιστία, η πληρότητα και η πρακτικότητα.

Λέξεις - κλειδιά

Ενεργειακή απόδοση, Αέρια του θερμοκηπίου, Αέρια Ρύπανση, Δείκτες ενεργειακής απόδοσης, Ναυτιλία



Abstract

The shipping industry plays a crucial role in global trade and transportation, accounting for a significant portion of global energy consumption and greenhouse gas emissions. Energy efficiency is, therefore, an important consideration for the industry to reduce its environmental impact and increase its competitiveness. This thesis evaluates and critically assesses the energy efficiency indicators used in the shipping sector to identify their strengths and weaknesses.

The research methodology used in this study involves a review of existing energy efficiency indicators used in the shipping sector. For more effective study, a separation was made into overall and specific indicators, with the latter referring to specific systems of the ship.

The findings of this study show that the energy efficiency indicators used in the shipping sector vary in their effectiveness and suitability. Based on critical evaluation, an analysis of the indicators is carried out, which is supported by criteria such as reliability, completeness, and practicality.

Keywords

Energy Efficiency, Greenhouse gases, Air pollution, Energy efficiency indicators, Maritime



Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες	i
Περίληψη	ii
Abstract	iii
Πίνακας Διαγραμμάτων	vi
Πίνακας Εικόνων	vii
Περιεχόμενα Πινάκων	viii
Κεφάλαιο 1 ^ο : Εισαγωγή	1
1.1 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας	1
1.2 Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας	2
Κεφάλαιο 2 ^ο : Μέθοδοι προσδιορισμού ενεργειακής απόδοσης	3
2.1. Θερμοδυναμικοί δείκτες	3
2.1.1 1 ^{ος} Θερμοδυναμικός Νόμος	4
2.1.2 2 ^{ος} Θερμοδυναμικός Νόμος	5
2.2 Φυσικό-θερμοδυναμικοί δείκτες	5
2.3 Οικονομικο-θερμοδυναμικοί δείκτες	6
2. 4 Οικονομικοί δείκτες	6
Κεφάλαιο 3 ^ο : Εκπομπές GHG από τη ναυτιλία	7
3.1 Φαινόμενο του Θερμοκηπίου	7
3.2 4 th IMO GHG Study	7
3.2.1 Emissions Inventory	8
3.2.2 Carbon Intensity	10
3.2.3 Emissions projections	12
Κεφάλαιο 4 ^ο : Θεσμικό πλαίσιο για τις εκπομπές GHG	14
4.1 International Maritime Organization (IMO)	14



4.2 Marine Pollution Convention (MARPOL).....	15
4.3 Κανονισμοί για τη μείωση των GHG.....	16
4.3.1 Χρονιές 1997 - 2018.....	16
4.3.2 Initial IMO Strategies 2018.....	18
4.3.3 Χρονιές 2018-2022.....	20
Κεφάλαιο 5 ^ο : Δείκτες ενεργειακής απόδοσης	21
5.1 Συνολικοί δείκτες ενεργειακής απόδοσης.....	21
5.1.1 Energy Efficiency Design Index (EEDI).....	21
5.1.2 Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI).....	26
5.1.3 Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI)	27
5.1.4 Carbon Intensity Indicator (CII).....	33
5.1.5 Energy Efficiency per Service Hour (EESH).....	37
5.1.6 Individual Ship Performance Indicator (ISPI).....	38
5.1.7 Existing Vessel Design Index (EVDI).....	38
5.2 Επιμέρους δείκτες ενεργειακής απόδοσης.....	40
5.2.1 Κινητήρες πρόωσης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	41
5.2.2 Συστήματα θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού HVAC	43
5.2.3 Αντλίες.....	49
5.2.4 Εναλλάκτες θερμότητας	51
5.2.5 Αεροσυμπιεστές.....	54
Κεφάλαιο 6 ^ο : Συμπεράσματα.....	57
Βιβλιογραφία	62



Πίνακας Διαγραμμάτων

Figure 1: Ετήσιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (CO _{2eq}) με βάση των μεθόδων bottom-up και top-down (International Maritime Organization, 2021)	9
Figure 2: Ποσοστό που καταλαμβάνουν τα αέρια του θερμοκηπίου (CO _{2eq}) κατά τη λειτουργία του πλοίου το 2018 (International Maritime Organization, 2021)	10
Figure 3: Ποσοστιαία μεταβολή των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα προς το μεταφερόμενο έργο για τη διεθνή ναυτιλία (International Maritime Organization, 2021)	11
Figure 4: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και το διεθνές εμπόριο από το 1990-2018 (International Maritime Organization, 2021).....	11
Figure 5: Σενάρια αύξησης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα μέχρι το 2050 (International Maritime Organization, 2021).....	12
Figure 6: Σχέση ισχύς και ταχύτητας λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή fw (IMO, 2012)	23
Figure 7: Συμμόρφωση πλοίων κατά τη 2 ^η φάση του EEDI ((Class NKK, 2015).....	26
Figure 8: Χρονική σειρά υιοθέτησης, εφαρμογής και αξιολόγησης του EEXI (Nippon Kaiji Kyokai, 2021)	28
Figure 9: Γραμμές αναφοράς EEXI και EEDI (Nippon Kaiji Kyokai, 2021)	30
Figure 10: Διαγράμματα ισχύος - στροφών για χρήση SHaPoLi και EPL (MEPC 75/15/Add.2, 2021)	33
Figure 11: Ταξινόμηση των πλοίων ανάλογα του εκτιμώμενου CII (HKJB & HKIMT, 2021)	36
Figure 12: Διάγραμμα εκτιμώμενου CII - χωρητικότητας (MEPC.353(78), 2022)	36
Figure 13: Καμπύλη Gauss (Rightship, 2022).....	39
Figure 14: Πραγματική ειδική κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει των στροφών και του βαθμού συμπίεσης.....	42
Figure 15: Υποδιαίρεση του συστήματος HVAC (Perez-Lombard, et al., 2011)	43
Figure 16: Διάγραμμα με καμπύλες κατάταξης της απόδοσης του ανεμιστήρα – Fan Energy Grade (Brendel, 2010).....	48



Figure 17: Ταξινόμηση και χαρακτηριστικά λειτουργίας αντλιών (p_k = πίεση κατάθλιψης, V = παροχή και z_{max} = μέγιστο ύψος αναρρόφησης) (Παπαϊωάννου, 2002)	50
Figure 18: Διάγραμμα χαρακτηριστικών καμπύλων φυγοκεντρικής αντλίας (πηγή: (Ahmari & Kabir, 2017)	51
Figure 19: Διάγραμμα θερμοκρασιακής μεταβολής εναλλακτών αντίθετης ροής (Δαγκίνης & Γλύκας, 2017).....	53
Figure 20: Διάγραμμα θερμοκρασιακής μεταβολής εναλλακτών ίδιας ροής (Καραπάντσιος, 2022)	53

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: LEMAG Shaftpower system (Chris Marine, 2022)	32
Εικόνα 2: Εφαρμογή συστήματος EPL (MEPC 75/15/Add.2, 2021).....	32
Εικόνα 3: Σύστημα φυσικού αερισμού (Mihai & Rusu, 2021)	46
Εικόνα 4: Διάταξη εξαερισμού στο χώρο μηχανοστασίου (Mihai & Rusu, 2021)	47
Εικόνα 5: Διάταξη μηχανικού εξαερισμού με σύστημα κλιματισμού (Mihai & Rusu, 2021)	47
Εικόνα 6: Παράλληλη ροή ρευστών (Δαγκίνης & Γλύκας, 2017)	52
Εικόνα 7: Αντίθετη ροή ρευστών (Καραπάντσιος, 2022)	52
Εικόνα 8: Σταυρωτής ροή ρευστών (Δαγκίνης & Γλύκας, 2017)	52
Εικόνα 9: Ταξινόμηση αεροσυμπιεστών (Δαγκίνης & Γλύκας, 2017)	55
Εικόνα 10: Διάγραμμα P-V παλινδρομικού αεροσυμπιεστή (Δαγκίνης & Γλύκας, 2017)	56



Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1: Παράμετροι γραμμών αναφοράς για πλοία άνω των 400 GT (Κοτρίκλα, 2015).....	25
Πίνακας 2: Συντελεστής μείωσης (%) του EEDI σε σχέση με τον EEDI των γραμμών αναφοράς (Κοτρίκλα, 2015) – ΔΕ* Δεν Εφαρμόζεται, ** Ο συντελεστής μείωσης υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των δύο ακραίων τιμών ανάλογα με το μέγεθος του σκάφους.....	25
Πίνακας 3: Συντελεστής μείωσης (%) του EEXI σε σχέση με τον EEDI των γραμμών αναφοράς (International Maritime Organization, 2021).....	29
Πίνακας 4: Συντελεστής μείωσης (%) του EEXI σε σχέση με τον EEDI των γραμμών αναφοράς (International Maritime Organization, 2021).....	30
Πίνακας 5: Παράγοντας μείωσης Z (MEPC.338(76), 2021).....	34
Πίνακας 6: Παράμετροι για τον καθορισμό των γραμμών αναφοράς (IMO, 2021) ...	35
Πίνακας 7: Τιμές των διανυσμάτων ανάλογα με τον τύπο πλοίου (MEPC.338(76), 2021).....	37
Πίνακας 7: Ταξινόμηση των πλοίων με βάση την αξιολόγηση τους για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Rightship, 2022)	39
Πίνακας 8: : Παρουσίαση και σύγκριση των συνολικών δεικτών ενεργειακής απόδοσης βάση κριτηρίων.....	60
Πίνακας 9: Παρουσίαση και σύγκριση των επιμέρους δεικτών ενεργειακής απόδοσης βάση κριτηρίων.....	61



Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή

1.1 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας

Το θαλάσσιο εμπόριο παρουσιάζει αυξητική τάση η οποία αποτυπώνεται από τον ολοένα μεγαλύτερο αριθμό πλοίων. Είναι χαρακτηριστικό πως το 2019, τουλάχιστον 11,08 δισεκατομμύρια τόνοι φορτίου μεταφέρθηκαν δια θαλάσσης, σημειώνοντας αύξηση κατά 85% σε σχέση με το 2000. Βασικό καύσιμο για τη μεταφορά όλων αυτών των αγαθών ήταν κατά κύριο λόγο το μαζούτ. (van Leeuwen & Monios, 2022)

Η χρήση ορυκτών καυσίμων προκαλεί αύξηση στις ανθρωπογενείς παραγωγές αερίων του θερμοκηπίου. Υπολογίζεται πως η ναυτιλία συνεισφέρει γύρω στο 2,89% στις παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Μπορεί το ποσοστό να φαίνεται μικρό σε σχέση με το αντίστοιχο από άλλους τομείς, αλλά η αύξηση του θαλάσσιου εμπορίου σε συνδυασμό με την έλλειψη υιοθέτησης κανονισμών για την αέρια ρύπανση μπορεί να οδηγήσει σε ραγδαία αύξηση του τα επόμενα χρόνια.

Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός, έχει θέσει ως στόχο τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 50% μέχρι το 2050. Για την επίτευξη αυτού του στόχου έχουν αρχίσει να υιοθετούνται μέτρα που σχετίζονται με την ενεργειακή απόδοση.

Η ενεργειακή απόδοση συνδέεται με τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Σημαντικό βήμα που έχει πραγματοποιήσει ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός γύρω από αυτό το κομμάτι αποτελεί η υποχρεωτική υιοθέτηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης από τη ναυτιλία.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει περιγραφή και ανάλυση των δεικτών ενεργειακής απόδοσης οι οποίοι διαχωρίζονται σε συνολικούς και επιμέρους. Από την ανάλυση θα προκύψουν τα κριτήρια με βάση τα οποία καθορίζονται τα σημεία που υστερεί ή πλεονεκτεί ο κάθε δείκτης. (van Leeuwen & Monios, 2022)



1.2 Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας

Παρακάτω γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των κεφαλαίων που απαρτίζουν τη διπλωματική εργασία.

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην ανάγκη για δημιουργία των δεικτών ενεργειακής απόδοσης στη ναυτιλία

Κεφάλαιο 2^ο: Μέθοδοι προσδιορισμού ενεργειακής απόδοσης

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται ανάλυση του ορισμού της ενεργειακής απόδοσης και παρουσιάζεται ο διαχωρισμός των δεικτών ανάλογα με την κατηγορία τους.

Κεφάλαιο 3^ο: Εκπομπές GHG από τη ναυτιλία

Πραγματοποιείται ανάλυση των αερίων του θερμοκηπίου που παράγονται από τη ναυτιλία και παρουσιάζονται κάποια μελλοντικά σενάρια.

Κεφάλαιο 4^ο: Θεσμικό πλαίσιο για τις εκπομπές GHG

Γίνεται αναφορά στους υποχρεωτικούς κανονισμούς που έχει θεσπίσει ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός γύρω από την ενεργειακή απόδοση.

Κεφάλαιο 5^ο: Δείκτες ενεργειακής απόδοσης

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των δεικτών ενεργειακής απόδοσης ή οποίοι διαχωρίζονται σε συνολικούς και επιμέρους.

Κεφάλαιο 6^ο: Συμπεράσματα

Το τελευταίο κεφάλαιο εξάγει τα συμπεράσματα μέσω κριτηρίων που προέκυψαν από τη μελέτη των δεικτών ενεργειακής απόδοσης.



Κεφάλαιο 2^ο: Μέθοδοι προσδιορισμού ενεργειακής απόδοσης

Η ενεργειακή απόδοση αποτελεί καίριο ζήτημα των σύγχρονων κοινωνιών. Συνδέεται τόσο με τον εμπορικό και βιομηχανικό ανταγωνισμό όσο και με την εξασφάλιση περιβαλλοντικών προτερημάτων, όπως είναι η μείωση του διοξειδίου του άνθρακα.

Ο ορισμός της ενεργειακής απόδοσης δεν χαρακτηρίζεται από κάποια συγκεκριμένη μονάδα μέτρησης. Ένα σύνολο δεικτών μπορεί να την ποσοτικοποιήσει, στηριζόμενοι στο αποτέλεσμα του ωφέλιμου παραγόμενου έργου, προς την ενέργεια που εισήχθη:

$$\text{Energy Efficiency} = \frac{\text{Useful output of a process}}{\text{Energy input into a process}}$$

Ο καθορισμός του έργου που παράγεται σε συνάρτηση με την ενέργεια που δίνεται σε ένα σύστημα, δημιουργεί ζητήματα που κυρίως σχετίζονται με τη σύγκριση της ενεργειακής απόδοσης. Για παράδειγμα, η ενέργεια που προσδίδεται σε δύο συστήματα πρέπει να είναι ομοιογενής, δηλαδή να μη συγκρίνεται η υψηλότερης ποιότητας ηλεκτρική ενέργεια με την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται μέσω του ήλιου. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, οι δείκτες της ενεργειακής απόδοσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε θερμοδυναμικούς (thermodynamic), φυσικό-θερμοδυναμικούς (physical-thermodynamic), οικονομικο-θερμοδυναμικούς (economic-thermodynamic) και οικονομικούς (economic). (Patterson, 1996)

2.1. Θερμοδυναμικοί δείκτες

Αυτοί οι δείκτες ενεργειακής απόδοσης προέρχονται εξολοκλήρου από το πεδίο της θερμοδυναμικής και συνήθως συγκρίνουν την παραγόμενη προς την ενδεικνύμενη ενέργεια. Χαρακτηρίζονται από δυναμικότητα αφού ανάλογα των συνθηκών που επικρατούν, παρέχουν ακριβείς μετρήσεις. (Patterson, 1996)



Τα εργαλεία αξιολόγησης της θερμοδυναμικής απόδοσης είναι:

- 1^{ος} Θερμοδυναμικός Νόμος
- 2^{ος} Θερμοδυναμικός Νόμος

2.1.1 1^{ος} Θερμοδυναμικός Νόμος

Ο 1^{ος} Θερμοδυναμικός Νόμος για τη ενεργειακή απόδοση αναφέρεται επίσης είτε σαν θερμική απόδοση είτε σαν απόδοση ενθαλπίας. Η απόδοση καθορίζεται με βάση το θερμικό περιεχόμενο που δίνεται και λαμβάνεται κατά τη διεργασία.

$$E_{\Delta H} = \frac{\Delta H_{out}}{\Delta H_{in}}$$

Όπου:

$E_{\Delta H}$: Βαθμός απόδοσης ενθαλπίας

ΔH_{out} : Άθροισμα της αξιοποιήσιμης ενέργειας

ΔH_{in} : Άθροισμα της προσδιδόμενης ενέργειας

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ένας λαμπτήρας πυράκτωσης ο οποίος έχει ενθαλπική απόδοση 6%, δηλαδή μόνο το 6% από την ενέργεια που το προσδίδεται μετατρέπεται σε φωτεινή ενέργεια, ενώ το υπόλοιπο 94% χάνεται στο περιβάλλον μέσω θερμικών απωλειών.

Αξίζει να αναφερθεί ότι ο 1^{ος} Θερμοδυναμικός Νόμος δεν λαμβάνει υπόψη την ποιότητα της ενέργειας. Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω με το παράδειγμα για τον ηλεκτρισμό, δεν γίνεται διάκριση των πηγών υψηλής ποιότητας ενέργειας, οι οποίες είναι πιο χρήσιμες και παραγωγικές, από τις πηγές με χαμηλής ποιότητας ενέργεια. (Patterson, 1996)



2.1.2 2^{ος} Θερμοδυναμικός Νόμος

Στην προσπάθεια να ξεπεραστεί το εμπόδιο της ενεργειακής ποιότητας που αντιμετωπίζει ο 1^{ος} Θερμοδυναμικός Νόμος, χρειάζεται να ληφθεί υπόψη και η εξέργεια ενός συστήματος. Η εξέργεια εκφράζει τη μέγιστη ικανότητα της ενέργειας για παραγωγή έργου από ένα σύστημα το οποίο βρίσκεται σε μία συγκεκριμένη κατάσταση. Βασικές παράμετροι από τις οποίες εξαρτάται η εξέργεια είναι οι συνθήκες του περιβάλλοντος, καθώς και οι ιδιότητες του συστήματος. (Patterson, 1996)

2.2 Φυσικό-θερμοδυναμικοί δείκτες

Αυτή η κατηγορία δεικτών εισάγει μία διαφορετική προσέγγιση ως προς το τελικό αποτέλεσμα μιας διεργασίας. Πιο συγκεκριμένα, αντί για τη χρήση θερμικού φορτίου ή παραγόμενου έργου, το αποτέλεσμα δίνεται σε φυσικές μονάδες.

Το χαρακτηριστικό αυτών των δεικτών ενεργειακής απόδοσης είναι πως διατηρούν σταθερό το θερμοδυναμικό κομμάτι που σχετίζεται με την πρόσδοση ενέργειας, ενώ με φυσικές μονάδες, όπως είναι οι τόνοι και τα μίλια, προσπαθούν να προσδιορίσουν το παραγόμενο κομμάτι.

Για παράδειγμα, στη μεταφορά ενός φορτίου είναι χρήσιμο να μετριοούνται τα χιλιόμετρα που διανύουν οι τόνοι του προς την ενέργεια που δαπανήθηκε: (Patterson, 1996)

$$\text{Energy Efficiency} = \frac{\text{Output (tonne kilometres)}}{\text{Energy Input } (\Delta H)}$$



2.3 Οικονομικο-θερμοδυναμικοί δείκτες

Αποτελούν υβριδικούς δείκτης στους οποίους η ενέργεια που εισάγεται μετρίεται σε μονάδες θερμοδυναμικής, ενώ το αποτέλεσμα δίνεται σε χρηματικές μονάδες. Η χρησιμότητα τους είναι σε διάφορους τομείς οικονομικής δραστηριότητας είτε σε τοπικό είτε σε εθνικό επίπεδο.

Ο πιο διαδεδομένος δείκτης ενεργειακής απόδοσης είναι το πηλίκο της ενέργειας προς το Ακαθάριστο Εθνικό Προϊόν, ο οποίος χρησιμοποιείται για να ταξινομήσει την ενεργειακή απόδοση των κρατών. (Patterson, 1996)

2.4 Οικονομικοί δείκτες

Οι οικονομικοί δείκτες ενεργειακής απόδοσης είναι αμιγώς δείκτες όπου τόσο η πρόσδοση ενέργειας όσο και το τελικό προϊόν εκφράζονται σε χρηματικές μονάδες.

Αναφερόμενοι ξανά στο πηλίκο ενέργειας προς το Ακαθάριστο Εθνικό Προϊόν, η έκφραση της ενέργειας μέσω χρηματικών μονάδων, αντί θερμοδυναμικών, θα μπορούσε να προσδιορίσει με μεγαλύτερη σαφήνεια την παραγωγικότητα που προκύπτει από την ενέργεια.

Επίσης, οι οικονομικοί δείκτες μπορούν να συγκρίνουν ανομοιογενείς πηγές ενέργειας, με δεδομένο ότι τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά δεν εμφανίζονται στο πηλίκο και αντικαθίστανται από τις κοινώς αποδεκτές χρηματικές μονάδες. (Patterson, 1996)



Κεφάλαιο 3^ο: Εκπομπές GHG από τη ναυτιλία

Οι διάφορες λειτουργίες του πλοίου, όπως είναι η πρόωση και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, συνδέονται με τη δαπάνη ενέργειας η οποία παράγεται κατά κύριο λόγο από ορυκτά καύσιμα. Αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας είναι η έκλυση αερίων του θερμοκηπίου (Green House Gases -GHG) με αρνητικές συνέπειες για το περιβάλλον. Συνεπώς, η παρακολούθηση και βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κρίνεται απαραίτητη για τη μείωση των εκλυόμενων GHG.

3.1 Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

Ο όρος «φαινόμενο του θερμοκηπίου» αναφέρθηκε για πρώτη φορά το 1827 από τον Jean Baptiste Fourier, ενώ ο Σουηδός χημικός Svante Arrhenius ήταν ο πρώτος που πρόβλεψε τον αρνητικό αντίκτυπο αυτού του φαινομένου το 1896. Παρατήρησε ότι οι υδρατμοί και το διοξείδιο του άνθρακα επιτρέπουν την εισχώρηση των ακτινών του ηλίου στην ατμόσφαιρα αλλά εγκλωβίζουν τη θερμότητα που θα απορριπτόταν στην ατμόσφαιρα. Επίσης, πρόβλεψε ότι τα ορυκτά καύσιμα θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε διπλασιασμό του διοξειδίου του άνθρακα που οφείλεται σε ανθρωπογενείς παράγοντες προκαλώντας έτσι την αύξηση της θερμοκρασίας κατά 5 βαθμούς Κελσίου.

Οι επιστήμονες μέχρι το 1957 θεωρούσαν ότι οι ωκεανοί μπορούσαν να απορροφήσουν το διοξείδιο του άνθρακα που εκλύεται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Ωστόσο, μετέπειτα έρευνες έδειξαν ότι μόνο η μισή ποσότητα διαλύεται στους ωκεανούς, οδηγώντας σε ολοένα μεγαλύτερη αύξηση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα το οποίο σαν αποτέλεσμα εκτιμάται ότι θα μπορούσε να επιφέρει αύξηση της θερμοκρασίας από 1,4 μέχρι και 5,8 βαθμούς Κελσίου μέχρι το 2100. (Jain, et al., 2015)

3.2 4th IMO GHG Study



Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (International Maritime Organization -IMO), από το 2000, με την 1^η μελέτη των αερίων του θερμοκηπίου (Green House Gases – GHG), κάνει μια προσπάθεια να καταγράψει τα ανθρωπογενή αέρια που εκπέμπονται από τη διεθνή ναυτιλία έτσι ώστε να προχωρήσει στην υιοθέτηση νέων αυστηρότερων κανονισμών με σκοπό τη μείωση τους.

Από το 2000 μέχρι σήμερα έχουν μεσολαβήσει συνολικά τέσσερις τέτοιες μελέτες, με την πιο πρόσφατη να είναι η 4^η μελέτη των αερίων του θερμοκηπίου το 2020. Παρακάτω θα ακολουθήσει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της, τα οποία βασίζονται στους εξής τρεις πυλώνες: (International Maritime Organization, 2021)

- Καταγραφή των εκλυόμενων αερίων του θερμοκηπίου
- Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά μονάδα έργου
- Εκτιμήσεις των μελλοντικών ρύπων μέχρι το 2050

3.2.1 Emissions Inventory

Τα βασικά αέρια του θερμοκηπίου που παράγει η ναυτιλία είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το μεθάνιο (CH₄) και το υποξείδιο του αζώτου (N₂O). Προκειμένου να υπάρξει ομοιογένεια ως προς το βαθμό που συμβάλλουν στη δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου, τα τελευταία δύο αέρια εκφράζονται σε ισοδυναμία με το διοξείδιο του άνθρακα (CO_{2eq}). Έτσι, 1 γραμμάριο μεθανίου αντιστοιχεί σε 28 γραμμάρια CO_{2eq}, ενώ 1 γραμμάριο υποξειδίου του αζώτου αντιστοιχεί σε 265 γραμμάρια CO_{2eq}.

Οι εκπομπές των παραπάνω αερίων που προέρχονται από τη ναυτιλία έχουν παρουσιάσει αύξηση της τάξεως του 9,3% το 2018 σε σχέση με τα επίπεδα όπου βρισκόντουσαν το 2012, δηλαδή από 962 εκατομμύρια τόνους σε 1,056 δισεκατομμύρια τόνους.

Στις συνολικές εκπομπές του ανθρωπογενούς διοξειδίου του άνθρακα που προέρχονται από όλους τους κλάδους, το μερίδιο της ναυτιλίας για το 2018 αντιστοιχεί στο 2,89%, σημειώνοντας μικρή αύξηση σε σχέση με το αντίστοιχο 2,76% το 2012.

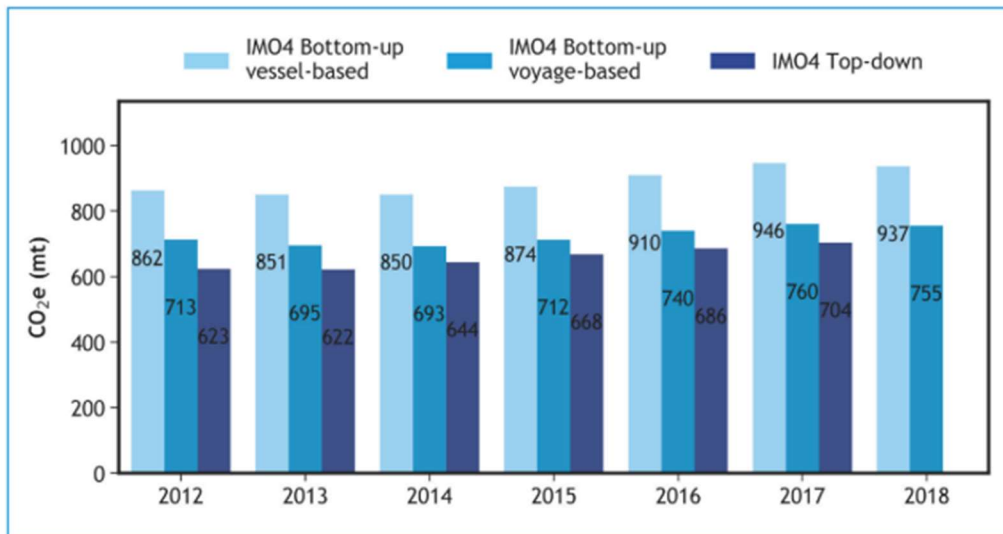


Figure 1: Ετήσιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (CO_{2e}) με βάση των μεθόδων bottom-up και top-down (International Maritime Organization, 2021)

Στο διάγραμμα γίνεται αναφορά των ετήσιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου με βάση τις εξής μεθόδους:

Bottom-up: Η εκτίμηση των εκλυόμενων ρύπων πραγματοποιείται από τα δεδομένα AIS που εκπέμπει το πλοίο κατά τη λειτουργία του. Με αυτά τα δεδομένα υπολογίζεται τόσο η κατανάλωση του καυσίμου όσο και οι εκπομπές ρύπων ανά ώρα. Αυτή η μέθοδος μπορεί να κάνει περαιτέρω διαχωρισμό των ρύπων σε vessel-based και voyage-based, όπου στο voyage-based μπορούν να υπολογιστούν οι ρύποι που εκλύονται κατά το ταξίδι μεταξύ δύο λιμένων.

Top-down: Η εκτίμηση των εκλυόμενων ρύπων στη ναυτιλία πραγματοποιείται μέσω στατιστικών δεδομένων που παρέχει η Διεθνής Οργάνωση Ενέργειας (International Energy Agency – IEA)

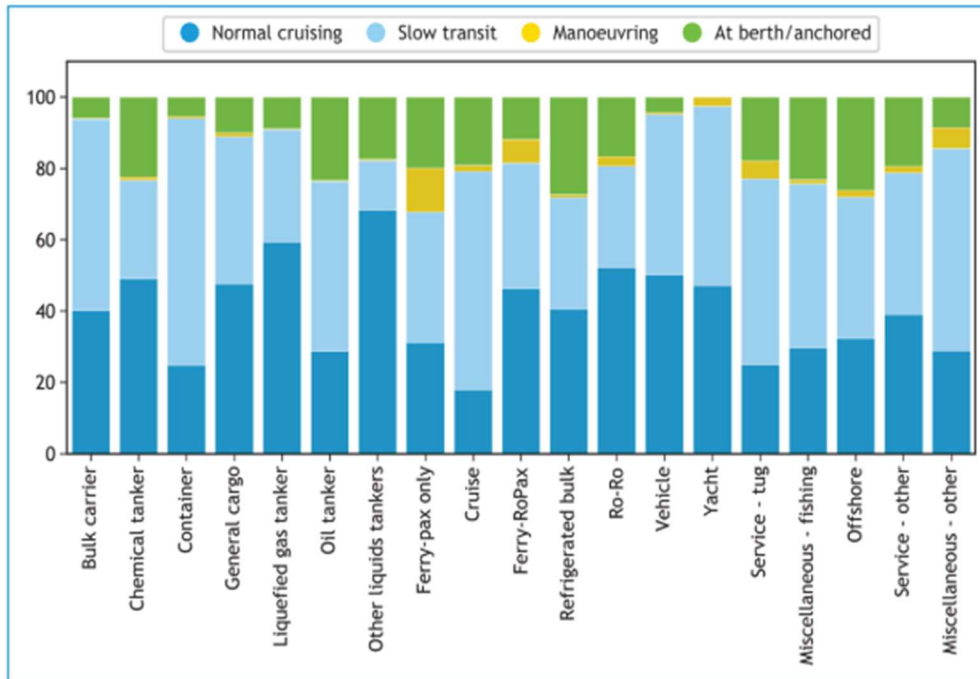


Figure 2: Ποσοστό που καταλαμβάνουν τα αέρια του θερμοκηπίου (CO_{2eq}) κατά τη λειτουργία του πλοίου το 2018 (International Maritime Organization, 2021)

Στο παραπάνω διάγραμμα αξίζει να παρατηρηθεί ότι τα chemical tankers και oil tankers, τα οποία ανήκουν σε μία από τις 6 κατηγορίες πλοίων που εκπέμπουν τους περισσότερους ρύπους, όταν βρίσκονται στον αγκυροβόλιο ή πάνε στην αποβάθρα εκλύεται το 20% των συνολικών τους ρύπων. (International Maritime Organization, 2021)

3.2.2 Carbon Intensity

Μεταξύ 2012 και 2018 παρατηρείται μείωση στις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου ανά μεταφερόμενο φορτίο. Σημαντικοί δείκτες που αντανακλούν αυτή τη μείωση είναι ο Annual Efficiency Ratio (AER) και ο Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI), όπου βελτιώθηκαν κατά 21% και 29% το 2018 σε σχέση με τα επίπεδα του 2008. Ωστόσο, η μεγαλύτερη μείωση, που αποτυπώνεται στα προηγούμενα ποσοστά, σημειώθηκε πριν το 2012, ενώ μετά το 2015 η αλλαγή είναι μόλις 1% με 2%.

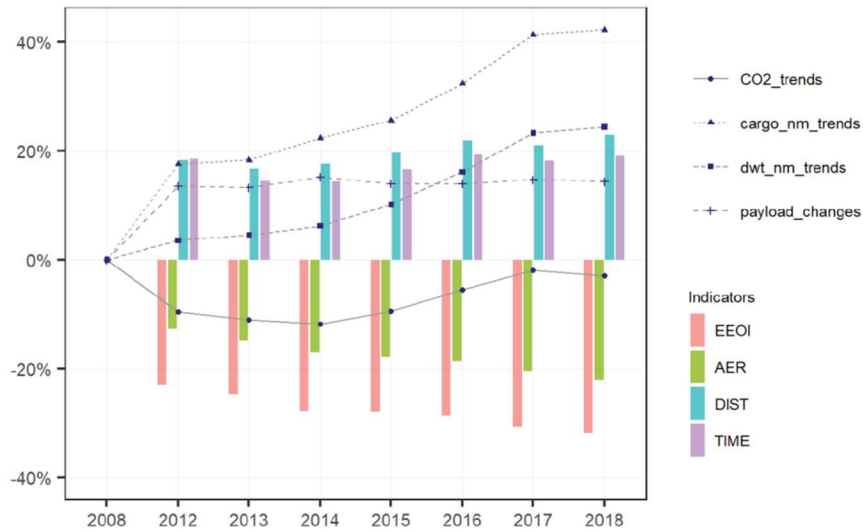


Figure 3: Ποσοστιαία μεταβολή των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα προς το μεταφερόμενο έργο για τη διεθνή ναυτιλία (International Maritime Organization, 2021)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι δείκτες EEOI και AER έχουν σημειώσει σημαντική μείωση σχετικά με τα επίπεδα του 2008. Οι δείκτες DIST, ή διαφορετικά Individual Ship Performance Indicator (ISPS), και TIME, ή αλλιώς Energy Efficiency per Service Hour (EESH), παρουσιάζουν αύξηση η οποία οφείλεται στη ναυπήγηση πλοίων μεγαλύτερης χωρητικότητας τα οποία ελαττώνουν την ταχύτητα τους. (International Maritime Organization, 2021)

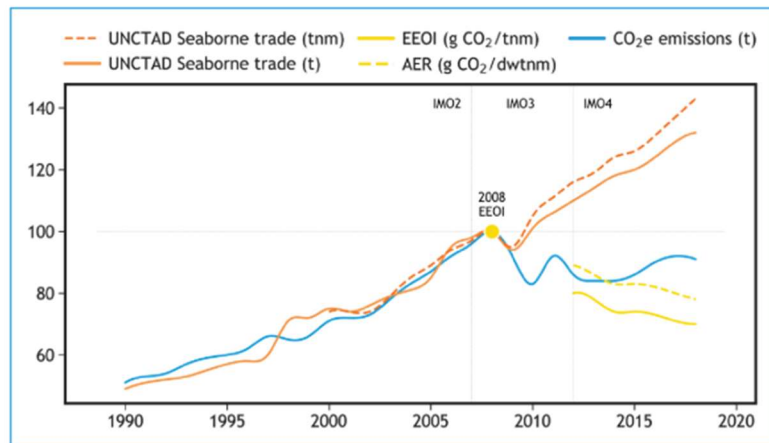


Figure 4: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και το διεθνές εμπόριο από το 1990-2018 (International Maritime Organization, 2021)



3.2.3 Emissions projections

Οι εκτιμήσεις που έχουν γίνει για τις μελλοντικές εκπομπές των ρύπων λαμβάνουν υπόψη την απουσία εφαρμογής κάποιου κανονισμού σχετικά με την ενεργειακή απόδοση στη ναυτιλία μέχρι το 2050. Συγκεκριμένα παρατηρείται στο χειρότερο σενάριο μια αύξηση μέχρι 1,5 δισεκατομμύρια τόνων διοξειδίου του άνθρακα μέχρι το 2050 το οποίο αντιστοιχεί σε μια αύξηση της τάξεως του 50% σε σχέση με τους 1 δισεκατομμύριο τόνους που καταγράφηκαν το 2018. (International Maritime Organization, 2021)

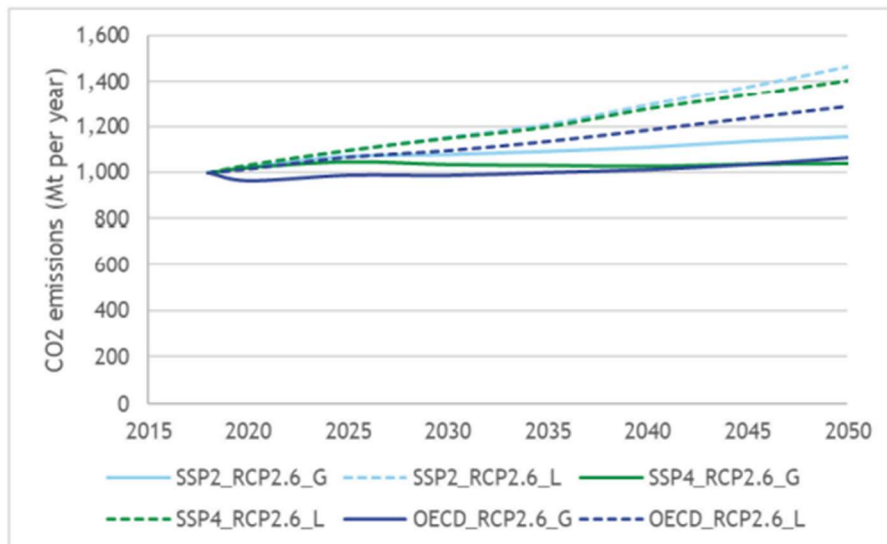


Figure 5: Σενάρια αύξησης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα μέχρι το 2050 (International Maritime Organization, 2021)

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, οι εκτιμήσεις βασίζονται στα εξής δύο σενάρια:

- Representative Concentration Pathways (RCPs): Είναι μια μέθοδος για την εκτίμηση των μελλοντικών εκπομπών. Λαμβάνουν υπόψη τέσσερα διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας επάνω στη Γη, με το πιο θετικό να είναι αυτό των $2,6 \text{ W/m}^2$ το οποίο θα οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας κάτω από 2°C .



- Shared Socio-economic Pathways (SSPs): Είναι σενάρια σχετικά με την εκτίμηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου λαμβάνοντας υπόψη κοινωνικούς και οικονομικούς παράγοντες μέχρι το 2100. Αυτά τα σενάρια διακρίνονται στα εξής: (International Maritime Organization, 2021)
 - 1) SSP1 Sustainability: Μεγάλη οικονομική ανάπτυξη σε συνδυασμό με μείωση της εξάρτησης σε ορυκτά καύσιμα. Η εξέλιξη της τεχνολογίας και η συνεργασία μεταξύ των κρατών αποτελούν τους βασικούς λόγους επίτευξης αυτού του σεναρίου.
 - 2) SSP2 Middle of the Road: Αποτελεί το σενάριο όπου η οικονομική ανάπτυξη είναι σταθερή με αποτέλεσμα τα κράτη που είναι λιγότερο αναπτυγμένα να καταφέρουν να φτάσουν τα ήδη αναπτυγμένα. Οι εκπομπές παραμένουν ίδιες με μικρότερα ποσοστά βελτίωσης.
 - 3) SSP3 Regional rivalry: Σε αυτό το σενάριο οι κοινωνίες αναπτύσσονται με χαμηλούς οικονομικούς ρυθμούς. Η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών ακολουθεί τους ίδιους ρυθμούς με την οικονομία δημιουργώντας υψηλές εκπομπές ρύπων και ανάγκη για λήψη αυστηρότερων μέτρων.
 - 4) SSP4 Inequality: Δημιουργείται μεγαλύτερο χάσμα μεταξύ των ανεπτυγμένων και των αναπτυσσόμενων χωρών. Οι χώρες που πετυχαίνουν μεγάλη ανάπτυξη καταφέρνουν να υιοθετούν καινοτόμες τεχνολογίες για την καταπολέμηση της περιβαλλοντικής ρύπανσης. Ωστόσο, η μείωση των εκπομπών δεν φαίνεται άμεσα, αφού δεν είναι όλες οι χώρες στο ίδιο επίπεδο ανάπτυξης.
 - 5) ~~SSP5 Fossil-Fueled Development~~: Στο σενάριο SSP5 οι κοινωνίες αναπτύσσονται με ταχείς ρυθμούς παραγκωνίζοντας το περιβάλλον. Οι ανεπτυγμένες κοινωνίες αναπτύσσουν καινοτόμες τεχνολογίες, ενώ οι αναπτυσσόμενοι εστιάζουν στη χρήση ορυκτών καυσίμων.



Κεφάλαιο 4^ο: Θεσμικό πλαίσιο για τις εκπομπές GHG

Η τάση για αύξηση του παγκόσμιου θαλάσσιου εμπορίου τα επόμενα χρόνια έχει οδηγήσει στην ανάγκη επίτευξης στόχων προκειμένου να περιοριστούν οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός υιοθέτησε το 2018 την αρχική Στρατηγική για τον περιορισμό των αερίων του θερμοκηπίου μέσω των παρακάτω στόχων: (International Maritime Organization, 2018)

- 1) Μείωση του παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα ανά παραγόμενο έργο μέσω της υιοθέτησης περαιτέρω φάσεων του Energy Efficiency Design Index (EEDI)
- 2) Μείωση του παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα ανά παραγόμενο έργο κατά 40% μέχρι το 2030 και κατά 70% μέχρι το 2050 σε σχέση με τα επίπεδα του 2008.
- 3) Μείωση των ετήσιων εκπομπών που σχετίζονται με τα αέρια του θερμοκηπίου κατά 50% μέχρι το 2050 σε σχέση με τα αντίστοιχα επίπεδα του 2008 και προσπάθεια για περαιτέρω για εξάλειψη τους μέχρι το τέλος του αιώνα.

4.1 International Maritime Organization (IMO)

Ο IMO (International Maritime Organization) αποτελεί ένα διεθνή ναυτιλιακό οργανισμό με σκοπό την ομαλή συνεργασία και ασφαλή επικοινωνία των χωρών στον τομέα της ναυσιπλοΐας. Ιδρύθηκε στη Γενεύη στις 17 Μαρτίου του 1948 με την ονομασία International Maritime Cooperation Organization και το 1982 μετονομάστηκε σε IMO. Η έδρα του βρίσκεται στο Λονδίνο. Η Ευρωπαϊκή Ένωση εκπροσωπείται στον IMO, όπου και εμπλέκεται δραστήρια στην ανάπτυξη των σχετικών ναυτιλιακών κανονισμών οι οποίοι υιοθετούνται από το ευρωπαϊκό δίκαιο. Σε γενικές γραμμές, η Ευρωπαϊκή Ένωση συντάσσεται με το πλαίσιο του IMO



αναφορικά με την ατμοσφαιρική ρύπανση από τα πλοία. Παράλληλα, ορισμένες φορές εργάζεται μονομερώς για την ανάπτυξη ευρωπαϊκών κανονισμών, οι οποίοι είναι αυστηρότεροι για πλοία που φέρουν ευρωπαϊκή σημαία ή ελλιμενίζονται σε ευρωπαϊκά λιμάνια. Οι προκλήσεις στη ναυτιλία για μία πιο οικολογική προσέγγιση των μεταφορών της έχει να κάνει με τα θεσμικά πλαίσια που έχουν ληφθεί σε διεθνές επίπεδο. Από το 1997 στο Kyoto, η United Nation Framework Convention on Climate Change έθεσε υπεύθυνο τον International Maritime Organization για τον περιορισμό των ρύπων από τη ναυτιλία. Το 2008, η Marine Environment Protection Committee, η οποία αποτελεί παρακλάδι του IMO, υιοθέτησε τροποποιήσεις σχετικά με το παράρτημα VI της MAR.POL. που σχετίζεται με την εκπομπή οξειδίων του αζώτου και θείου. (Τρύπατζη, 2017)

4.2 Marine Pollution Convention (MARPOL)

Η Διεθνής Σύμβαση για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος (MARPOL) υιοθετήθηκε το 1973 και αποτελεί τη βασική σύμβαση του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού για τη μείωση της θαλάσσιας ρύπανσης. Αποτελείται από τα εξής παραρτήματα:

- Παράρτημα I: Κανονισμοί για την πρόληψη της ρύπανσης από πετρέλαιο.
- Παράρτημα II: Κανονισμοί για τον έλεγχο της ρύπανσης από υγρές επιβλαβείς ουσίες χύδην.
- Παράρτημα III: Κανονισμοί για την πρόληψη της ρύπανσης από επιβλαβείς ουσίες σε συσκευασμένη μορφή.
- Παράρτημα IV: Κανονισμοί για την πρόληψη της ρύπανσης από λύματα
- Παράρτημα V: Κανονισμοί για την πρόληψη της ρύπανσης από τα απορρίμματα των πλοίων
- Παράρτημα VI: Κανονισμοί για την αντιμετώπιση της αέριας ρύπανσης

Το παράρτημα VI υιοθετήθηκε το 1997 και έχει σκοπό τη μείωση των βασικών αέριων ρύπων όπως είναι τα οξείδια του θείου (SO_x), τα οξείδια του αζώτου (NO_x),



τις πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) και θέτει ενεργειακά πρότυπα με σκοπό τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου. Πίσω από τη συνεχή υιοθέτηση καινούργιων κανονισμών και την τροποποίηση της σύμβασης MARPOL είναι η επιτροπή προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος (Marine Environment Protection Committee – MEPC), όπου ο ρόλος της είναι να αξιολογεί τις τεχνολογικές εξελίξεις προκειμένου να προβαίνει σε αυστηρότερους κανονισμούς για τη μείωση της ρύπανσης. (www.imo.org)

4.3 Κανονισμοί για τη μείωση των GHG

4.3.1 Χρονιές 1997 - 2018

Ο IMO το 2000 παρουσίασε την πρώτη μελέτη για τα αέρια του θερμοκηπίου, οπότε και αποφασίστηκε να σχηματιστεί μια ομάδα εργασίας σχετικά με το θέμα. Το 2003 η ολομέλεια του IMO κάλεσε τη MEPC να αναπτύξει κανονισμούς για του διοξειδίου του άνθρακα, στο οποίο θα ανάγονταν μέσω ισοδυναμίας και οι υπόλοιποι ρύποι που συνθέτουν τα αέρια του θερμοκηπίου. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο περιλαμβάνεται ένας δείκτης εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και η σχετική γραμμή αναφοράς.

Το 2005 η MEPC 53 ενέκρινε τις προσωρινές οδηγίες για την εφαρμογή ενός εθελοντικού δείκτη εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και κάλεσε τις χώρες να τον δοκιμάσουν και να υποβάλουν σχετικές εκθέσεις.

Το 2006 η MEPC 55 υιοθέτησε ένα πρόγραμμα εργασιών που θα κατέληγε το 2009 με στόχους τη βελτίωση του δείκτη εκπομπών, την καθιέρωση των γραμμών αναφοράς και την μελέτη τεχνικών, λειτουργικών και αγοροκεντρικών μηχανισμών για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Στη MEPC 57 του Απριλίου 2008 αποφασίστηκε με συντριπτική πλειοψηφία η υιοθέτηση εννέα αρχών που θα διέπουν την συζήτηση για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Ανάμεσα σε αυτές περιλαμβάνονταν όλα τα μέτρα τα οποία είναι αποτελεσματικά για την καταπολέμηση των αερίων του θερμοκηπίου χωρίς όμως να επηρεάζεται το διεθνές εμπόριο και κατ' επέκταση η οικονομία Στο σημείο αυτό



προτάθηκαν αγοροκεντρικά εργαλεία και συγκεκριμένα η Νορβηγία, η Γερμανία και η Γαλλία έκαναν προτάσεις για εμπόριο ρύπων στη ναυτιλία, ενώ η Δανία πρότεινε έναν παγκόσμιο φόρο στα ναυτιλιακά καύσιμα. Επίσης προτάθηκε τα νέα μέτρα να αποτελέσουν ξεχωριστή σύμβαση του IMO και όχι να ενσωματωθούν στη MARPOL. Στη MEPC 58 του Οκτωβρίου 2008 αποκαλύφθηκε μεγάλη διαίρεση των κρατών πάνω στα ανωτέρω θέματα. Επιπλέον, τέθηκε το θέμα της ανάγκης ευνοϊκότερης αντιμετώπισης των αναπτυσσόμενων κρατών σε σχέση με τα αναπτυγμένα.

Έτσι λοιπόν, την 1η Ιανουαρίου 2013 τέθηκαν σε ισχύ οι προβλέψεις του νέου Κεφαλαίου 4 του Παραρτήματος VI της MARPOL, το οποίο εισάγει μέτρα που έχουν στόχο την ενεργειακή βελτίωση, ώστε να περιοριστεί τόσο η κατανάλωση καυσίμων όσο και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Στον Κανονισμό 21 του Κεφαλαίου 4 εισάγεται ο Δείκτης Αποδοτικού Ενεργειακού Σχεδιασμού (Energy Efficiency Design Index – EEDI), ο οποίος λαμβάνει υπόψη τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πλοίου, ενώ ταυτόχρονα είναι υποχρεωτικός για τα νέα πλοία. Παράλληλα, στον Κανονισμό 22 εισάγεται και ένα υποχρεωτικό εργαλείο διαχείρισης (Ship Energy Efficiency Management Plan – SEEMP), το οποίο αφορά τα λειτουργικά χαρακτηριστικά και είναι υποχρεωτικό για όλα τα πλοία. Για να μπορέσει ένα πλοίο να αποκτήσει το Διεθνές Πιστοποιητικό Ενεργειακής Αποδοτικότητας (International Energy Efficiency Certificate – IEEC), θα πρέπει να τηρεί τις απαιτήσεις για τον EEDI και το SEEMP.

Το 2016, η επιτροπή προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος κατά το 70^ο συνέδριο τροποποίησε τη Σύμβαση MARPOL προκειμένου να εισάγει ένα θεσμικό πλαίσιο μέσα στο οποίο θα γίνεται συλλογή δεδομένων που θα αφορούν την κατανάλωση καυσίμων ενός πλοίου (Data Collection System – DCS). Την 1^η Μαρτίου 2018 υιοθετήθηκε ο κανονισμός 22^A του παραρτήματος VI, στο Κεφάλαιο 4, όπου προβλέπει τη συλλογή δεδομένων κατανάλωσης καυσίμου από όλα τα πλοία άνω των 5000 GT με στόχο την ανάλυση αυτών των δεδομένων και την λήψη αποφάσεων για νέων μέτρων μείωσης των αέριων ρύπων. (www.imo.org)



4.3.2 Initial IMO Strategies 2018

Το 2018 ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός έθεσε για πρώτη φορά τους στόχους της ναυτιλίας για τη μείωση των ρύπων ανακοινώνοντας την αρχική στρατηγική για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου. Ο στόχος είναι η μείωση των εκπομπών τουλάχιστον κατά 50% μέχρι το 2050 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2008. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, η στρατηγική που θα ακολουθηθεί στηρίζεται στα εξής:

1. Ενίσχυση της συμβολής του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού στην προσπάθεια αντιμετώπισης των αερίων του θερμοκηπίου από τη διεθνή ναυτιλία.
2. Αναγνώριση των μέτρων που πρέπει να ληφθούν από τη ναυτιλία για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, χωρίς όμως αυτό να έχει επίπτωση στο παγκόσμιο εμπόριο.
3. Αναγνώριση δράσεων και μέτρων για την επίτευξη των παραπάνω στόχων και η δημιουργία κινήτρων για την έρευνα και ανάπτυξη νέων τεχνολογιών.

Η αρχική στρατηγική του IMO περιλαμβάνει μια λίστα από μέτρα που χαρακτηρίζονται από διαφορετικό χρονικό ορίζοντα εφαρμογής. Τέτοια μέτρα είναι, για παράδειγμα, η βελτίωση των ήδη υπαρχόντων μέτρων ενεργειακής απόδοσης, ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ κρατών με σκοπό την τεχνολογική εξέλιξη, επιβράβευση των οικολογικών πλοίων στα λιμάνια και ενίσχυση τόσο της έρευνας όσο και της ανάπτυξης νέων τεχνολογιών και καυσίμων. Παρακάτω ακολουθεί μια αναφορά των μέτρων, τα οποία είναι κατηγοριοποιημένα ανάλογα με τη χρονική πιθανότητα εφαρμογής τους:

- Short-term measures: Είναι τα μέτρα που θα οριστικοποιηθούν μεταξύ 2018 και 2023 και περιλαμβάνουν:



- 1) Βελτίωση του EEDI και SEEMP
 - 2) Ανάπτυξη δεικτών ενεργειακής απόδοσης αναφερόμενοι τόσο στο τεχνικό όσο και στο λειτουργικό κομμάτι ενός πλοίου, όπως είναι ο Ετήσιος Δείκτης Απόδοσης (Annual Efficiency Ratio – AER) και ο Ατομικός Δείκτης Απόδοσης του πλοίου (Individual Ship Performance Indicator – ISPI)
 - 3) Καθιέρωση προγραμμάτων βελτίωσης του υπάρχοντος στόλου.
- Mid-term measures: Είναι τα μέτρα που θα οριστικοποιηθούν μεταξύ 2023 και 2030 με σκοπό την ελάττωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα ανά παραγόμενο έργο τουλάχιστον κατά 40%:
- 1) Εφαρμογή προγράμματος για τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων χαμηλής ή και μηδαμινής περιεκτικότητας σε άνθρακα.
 - 2) Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου μέσω λειτουργικών μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας για καινούργια και ήδη υπάρχοντα πλοία.
 - 3) Υιοθέτηση νέων αγοροκεντρικών μέτρων (Market-Based Measures – MBMs) με σκοπό τη δημιουργία ακόμα περισσότερων κινήτρων για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.
- Long-term measures: Αφορά μέτρα που θα ληφθούν μετά το 2030 για τη περαιτέρω μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα ανά παραγόμενο έργο κατά 70%:
- 1) Ανάπτυξη καυσίμων με μηδενική περιεκτικότητα σε άνθρακα με σκοπό την απανθρακοποίηση του ναυτιλιακού τομέα μέχρι το δεύτερο μισό του αιώνα.



- 2) Ανάπτυξη και υιοθέτηση νέων τεχνολογικών μέτρων για τη μείωση της αέριας ρύπανσης.

Αξίζει να αναφερθεί, πώς μέχρι σήμερα οι στόχοι που τέθηκαν μεταξύ 2018 και 2023 έχουν επιτευχθεί μέσα από τη βελτίωση του EEDI και του SEEMP καθώς επίσης και την υιοθέτηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης που αφορούν τόσο τα τεχνικά, όπως ο EEXI, όσο και τα λειτουργικά, όπως ο CII, στοιχεία του πλοίου. (International Maritime Organization, 2018)

4.3.3 Χρονιές 2018-2022

Κατά τη διάρκεια της 76^{ης} συνεδρίας της επιτροπής προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος τον Ιούνιο του 2021, υιοθετήθηκαν καινούργιες τροποποιήσεις στο παράρτημα VI της Σύμβασης MARPOL οι οποίες εισήγαγαν δύο νέους δείκτες ενεργειακής απόδοσης:

- Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI): Αποτελεί μια προσπάθεια βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των ήδη υπάρχοντων πλοίων λαμβάνοντας υπόψη τα τεχνικά χαρακτηριστικά. Έτσι, ο υπολογισμός του EEXI εξαρτάται από το σχεδιασμό και τον εξοπλισμό του εκάστοτε πλοίου.
- Carbon Intensity Indicator (CII): Είναι ένας ενεργειακός δείκτης που σχετίζεται με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του πλοίου και συμβάλλει στο στόχο που έχει θέσει ο IMO για μείωση του των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα ανά παραγόμενο έργο κατά 40% μέχρι το 2030. Επίσης, ο IMO υιοθέτησε και μια κλίμακα έτσι ώστε να ταξινομεί τα πλοία με βάση την ενεργειακή τους απόδοση. (www.imo.org)



Κεφάλαιο 5^ο: Δείκτες ενεργειακής απόδοσης

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά οι δείκτες ενεργειακής απόδοσης οι οποίοι έχουν κατηγοριοποιηθεί σε συνολικούς και επιμέρους. Οι συνολικοί δείκτες εξετάζουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα συνολικά, ενώ οι επιμέρους δείκτες βοηθούν στην ανάλυση της ενεργειακής απόδοσης του κάθε συστήματος επάνω στο πλοίο.

5.1 Συνολικοί δείκτες ενεργειακής απόδοσης

Οι συνολικοί δείκτες που περιγράφονται παρακάτω αποτυπώνουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ενός πλοίου ανά παραγόμενο έργο. Συγκεκριμένα, το παραγόμενο έργο σχετίζεται με την μεταφορά φορτίου ανά την απόσταση που διανύει ένα πλοίο μέχρι το λιμάνι φόρτωσης και εκφόρτωσης. Βασική διαφορά μεταξύ των συνολικών δεικτών ενεργειακής απόδοσης αποτελεί ο τρόπος υπολογισμού τους, όπου εκεί οι δείκτες ενεργειακής απόδοσης είτε προέρχονται εξ 'ολοκλήρου από τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά είτε από τον τρόπο λειτουργίας ενός πλοίου.

Οι συνολικοί δείκτες ενεργειακής απόδοσης που επιλέχθηκαν για να αναλυθούν στην παρούσα υποενότητα έχουν κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Τα βασικότερα περιορίζονται στο γεγονός ότι έχουν υποχρεωτική εφαρμογή ή αποτελούν προτάσεις για μελλοντική υιοθέτηση.

5.1.1 Energy Efficiency Design Index (EEDI)

Ο Δείκτης Αποδοτικού Ενεργειακού Σχεδιασμού είναι υποχρεωτικός από το 2013 για όλα τα νέα πλοία και εκφράζει το λόγο του κόστους για το περιβάλλον προς το όφελος που προκύπτει για την κοινωνία από τις μεταφορές που πραγματοποιούνται. Το κλάσμα που προκύπτει μεταφράζεται στις εκπομπές CO₂ από το πλοίο προς το μεταφορικό έργο που προσφέρει: (International Maritime Organization, 2018)



$$EEDI = \frac{P * SFC * C_F}{Capacity * V_{ref}} = \left(\frac{g CO_2}{tonnes * nm} \right)$$

$$\frac{\left(\prod_{j=1}^n f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + \left(P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{FAE} \right) + \left(\left(\prod_{j=1}^n f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{nPTO} f_{off(i)} \cdot P_{AEoff(i)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{FAE} \right) - \left(\sum_{i=1}^{nPTO} f_{off(i)} \cdot P_{off(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)}{f_i \cdot f_c \cdot f_j \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref}}$$

Όπου:

- $P_{ME(i)}$: Εγκατεστημένη ισχύς των κυρίων μηχανών στο 75% του MCR
- $P_{AE(i)}$: Ισχύς των βοηθητικών μηχανών. Αξίζει να τονιστεί πως ο μηχανικός εξοπλισμός που περιλαμβάνεται αφορά την πρόωση και τη ενδιαίτηση, όπως τις αντλίες καυσίμου της κύριας μηχανής και το σύστημα ναυσιπλοΐας. Δεν συμπεριλαμβάνεται η ισχύς που αξιοποιείται για τις αντλίες φορτίου, τους βοηθητικούς προωστήρες καθώς και άλλων εξοπλισμών που δεν σχετίζονται την κύρια πρόωση και ναυσιπλοΐα του πλοίου.
- SFC: Ειδική κατανάλωση καυσίμου της μηχανής (g/kWh)
- $C_{FME(i)}$: Αδιάστατος συντελεστής εκπομπής που αφορά το περιεχόμενο του καυσίμου σε άνθρακα που αποδίδει την ποσότητα CO₂ που εκπέμπεται από την καύση μιας ποσότητας καυσίμου στην κύρια μηχανή.
- $C_{FAE(i)}$: Αδιάστατος συντελεστής εκπομπής που αφορά το περιεχόμενο του καυσίμου σε άνθρακα που αποδίδει την ποσότητα CO₂ που εκπέμπεται από την καύση μιας ποσότητας καυσίμου στις βοηθητικές μηχανές.
- Capacity: Χωρητικότητα του πλοίου η οποία λαμβάνεται ως εξής:
 - 100% του DWT για πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου, δεξαμενόπλοια, υγραεριοφόρα, LNG, οχηματαγωγά, πλοία γενικού φορτίου, καταψυγμένου φορτίου και συνδυασμένων μεταφορών. (tons)
 - 70% του DWT για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. (tons)
 - Ολική χωρητικότητα για κρουαζιερόπλοια και επιβατικά πλοία. (tons)
- V_{ref} : Ταχύτητα σχεδίασης του πλοίου στη μέγιστη κατάσταση φόρτωσης με βαθιά νερά και συνθήκες ήρεμης θάλασσας και απουσίας ανέμου (knots)
- PTI: Η ισχύς του αξονικού κινητήρα στο 75% (Power Take In)
- PTO: Η ισχύς της αξονικής γεννήτριας στο 75% (Power Take off)



- P_{eff} : Είναι η μηχανική ισχύς στο 75% των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου
- P_{AEff} : Είναι η ηλεκτρική ισχύς στο 75% των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης.
- f_c : συντελεστής για τη διόρθωση της χωρητικότητας σε κυβικά πόδια ή μέτρα
- f_i : συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς στη χωρητικότητα ενός πλοίου λόγω των κανονισμών.
- f_j : συντελεστής που σχετίζεται με την ισχύ λόγω συγκεκριμένων ιδιοτήτων ως προς το σχεδιασμό ενός πλοίου.
- f_k : συντελεστής σχετιζόμενος με τη μείωση της χωρητικότητας ενός πλοίου λόγω μηχανημάτων φορτοεκφόρτωσης.
- f_w : συντελεστής που λαμβάνει υπόψη της μείωση της ταχύτητας εξαιτίας των καιρικών συνθηκών. Συγκεκριμένα, λαμβάνει υπόψη τη μείωση της ταχύτητας λόγω κυματισμών και ανέμων.

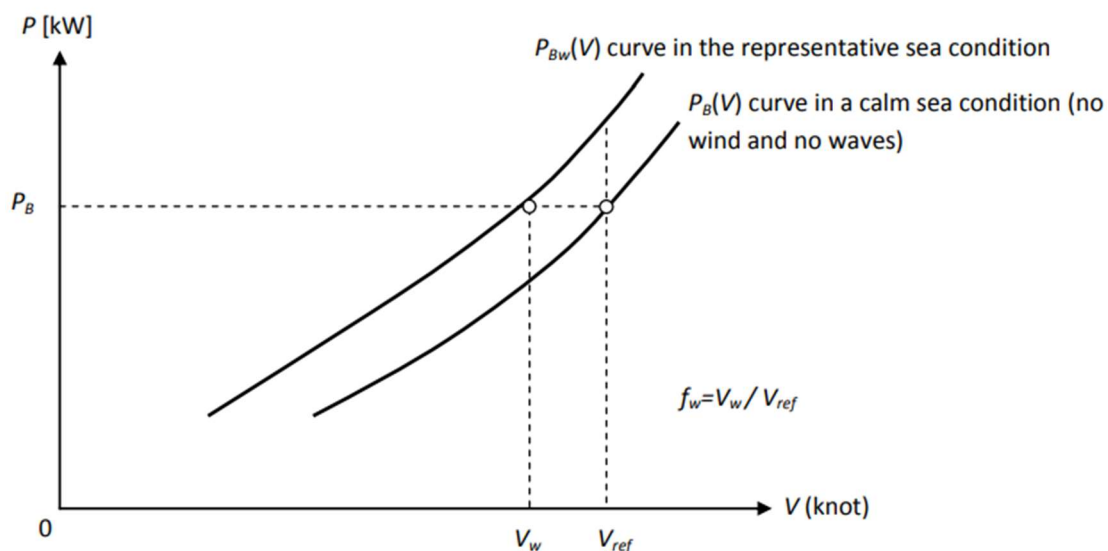


Figure 6: Σχέση ισχύς και ταχύτητας λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή f_w (IMO, 2012)

Ο EEDI υιοθετήθηκε με απόφαση της MEPC.203(62) στις 15 Ιουλίου 2011, στο Παράρτημα VI της MARPOL, στο Κεφάλαιο 4 “Regulations on Energy Efficiency for



Ships” και είναι υποχρεωτικός για όλα τα πλοία χωρητικότητας μεγαλύτερης των 400 GT των οποίων: (Κοτρίκλα, 2015)

- i. Το building contract είναι από τη 1^η Ιανουαρίου του 2013 και μετά (νέο πλοίο)
- ii. Αν δεν υπάρχει building contract, το keel laid είναι από τη 1^η Ιουλίου του 2013 και μετά (νέο πλοίο)
- iii. Το delivery date είναι μετά την 1^η Ιουλίου 2015 (νέο πλοίο)
- iv. Έχει πραγματοποιηθεί μια εκτενής μετασκευή (υπάρχων πλοίο)
- v. Έχει πραγματοποιηθεί μια εκτενής μετασκευή σε σημείο όπου το πλοίο θεωρείται new constructed. (υπάρχων πλοίο)

Ο σκοπός του απαιτούμενου (required) EEDI είναι να εξασφαλίζει τα ελάχιστα όρια ενεργειακής απόδοσης ενός καινούργιου πλοίου και μέσω γραμμών αναφοράς να ωθεί σε περαιτέρω αύξηση της ενεργειακής απόδοσης.

$$\text{Attained EEDI} \leq \text{Required EEDI} = (1-X/100) * \text{Reference Line Value}$$

Όπου:

- X: Είναι ο συντελεστής μείωσης του EEDI σε σχέση με τον EEDI των γραμμών αναφοράς και δίνεται από τον παρακάτω πίνακα.
- Reference Line Value:

$$\text{Reference Line Value} = a*(100\% \text{ deadweight})^{-c}$$

Σύμφωνα με την απόφαση της MEPC(231(65)) ο υπολογισμός των γραμμών αναφοράς δίνεται από τον παραπάνω τύπο. Οι παράμετροι a και c καθορίζονται από δεδομένα παλινδρομικής ανάλυσης, που στηρίζονται στη βάση δεδομένων HIS



Fairplay για πλοία άνω των 400 GT που παραδόθηκαν από 1^η Ιανουαρίου 1999 μέχρι 1^η Ιανουαρίου 2009. (Κοτρίκλα, 2015)

Τύπος πλοίου	a	c	R ²	Πληθυσμός	Εξαιρέθηκαν
Μεταφοράς χύδην φορτίου	961,79	0,477	0,9289	2.512	16
Μεταφοράς αερίου	1120,00	0,456	0,9446	354	0
Δεξαμενόπλοιο	1218,80	0,488	0,9574	3.655	14
Μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων	186,52	0,200	0,6191	2.406	32
Γενικού φορτίου	107,48	0,216	0,3344	2.086	47
Μεταφοράς κατεψυγμένου φορτίου	227,01	0,244	0,5130	61	1
Συνδυασμένου φορτίου	1219,00	0,488	0,9575	6	0

Πίνακας 1: Παράμετροι γραμμών αναφοράς για πλοία άνω των 400 GT (Κοτρίκλα, 2015)

Τύπος πλοίου	Μέγεθος	Φάση 0 (1/1/2013- 31/12/2014)	Φάση 1 (1/1/2015- 31/12/2019)	Φάση 2 (1/1/2020- 31/12/2024)	Φάση 3 (1/1/2025 και μετά)
Μεταφοράς χύδην φορτίου	20.000 DWT και άνω	0	10	20	30
	10.000 – 20.000 DWT	ΔΕ*	0-10**	0-20**	0-30**
Μεταφοράς αερίου	10.000 DWT και άνω	0	10	20	30
	2.000-10.000 DWT	ΔΕ*	0-10**	0-20**	0-30**
Δεξαμενόπλοιο	20.000 DWT και άνω	0	10	20	30
	4.000-20.000 DWT	ΔΕ*	0-10**	0-20**	0-30**
Εμπορευματοκιβωτίων	15.000 DWT και άνω	0	10	20	30
	10.000-15.000 DWT	ΔΕ*	0-10**	0-20**	0-30**
Γενικού φορτίου	15.000 DWT και άνω	0	10	15	30
	3.000-15.000 DWT	ΔΕ*	0-10**	0-15**	0-30**
Μεταφοράς κατεψυγμένου φορτίου	5.000 DWT και άνω	0	10	15	30
	3.000-5.000 DWT	ΔΕ*	0-10**	0-15**	0-30**
Συνδυασμένου φορτίου	20.000 DWT και άνω	0	10	20	30
	4.000-20.000 DWT	ΔΕ*	0-10**	0-20**	0-30**

Πίνακας 2: Συντελεστής μείωσης (%) του EEDI σε σχέση με τον EEDI των γραμμών αναφοράς (Κοτρίκλα, 2015) – ΔΕ* Δεν Εφαρμόζεται, ** Ο συντελεστής μείωσης υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των δύο ακραίων τιμών ανάλογα με το μέγεθος του σκάφους.

Με δεδομένο ότι αυτή τη χρονική περίοδο τα νέα πλοία καλούνται να συμμορφώνονται με τη 2^η φάση του EEDI, παρατίθεται παρακάτω ένα χρονοδιάγραμμα συμμόρφωσης λαμβάνοντας υπόψη τα εξής τέσσερα σενάρια:

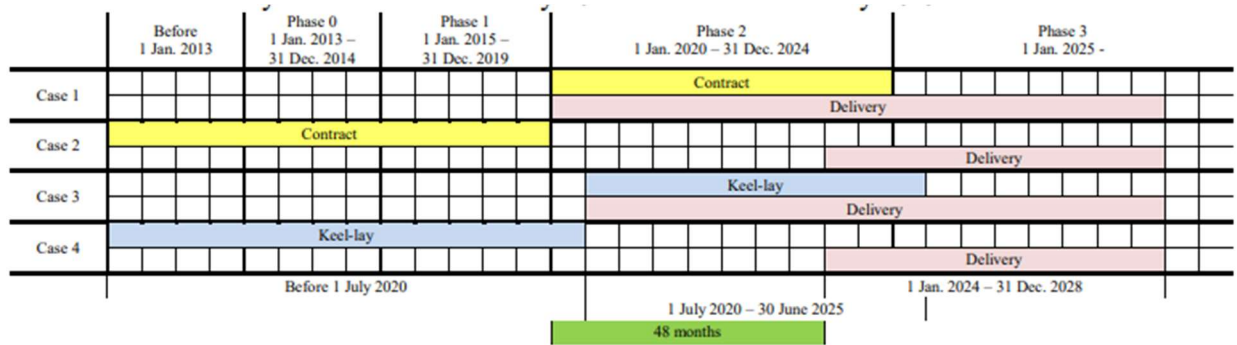


Figure 7: Συμμόρφωση πλοίων κατά τη 2^η φάση του EEDI (Class NKK, 2015)

- Σενάριο 1^ο: Πλοία με building contract από 1^η Ιανουαρίου 2020 και χρόνο παράδοσης πριν την 1^η Ιανουαρίου 2029
- Σενάριο 2^ο: Πλοία με building contract από 1^η Ιανουαρίου 2013 και χρόνο παράδοσης μεταξύ 1^η Ιανουαρίου 2024 και 1^η Ιανουαρίου 2029
- Σενάριο 3^ο: Πλοία όπου είτε έχουν έναρξη κατασκευής (keel lay) είτε κατασκευάζονται ήδη μεταξύ 1^η Ιουλίου 2020 και 1^η Ιουλίου 2025 και έχουν ο χρόνος παράδοσης είναι πριν την 1^η Ιανουαρίου 2029
- Σενάριο 4^ο: Πλοία όπου είτε ο χρόνος έναρξης κατασκευής είτε είναι ήδη υπό κατασκευή πριν την 1^η Ιουλίου του 2020 και ο χρόνος παράδοσης είναι μεταξύ 1^η Ιανουαρίου 2024 και 1^η Ιανουαρίου 2029

5.1.2 Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI)

Ο Δείκτης Αποδοτικού Ενεργειακού Σχεδιασμού εκφράζει το λόγο του κόστους για το περιβάλλον προς την όφελος που προκύπτει για την κοινωνία από τις μεταφορές που πραγματοποιεί ένα πλοίο. Το κλάσμα που προκύπτει μεταφράζεται στις εκπομπές CO₂ από το πλοίο προς το μεταφορικό έργο που προσφέρει.

$$EEOI = \frac{\sum_j * FC_j * C_{Fj}}{m_{cargo} * D} \left(\frac{g CO_2}{tonnes * nm} \right)$$

Όπου:

- j: Τύπος καυσίμου
- FC_j: Μάζα καυσίμου που καταναλώθηκε στο ταξίδι (tons)
- C_{Fj}: Συντελεστής εκπομπής που αποδίδει τη μάζα CO₂ που εκπέμπεται από την καύση μιας ορισμένης μάζας καυσίμου (tons CO₂ / tons fuel)



- m_{cargo} : Φορτίο που μεταφέρθηκε στο ταξίδι σε τόνους, αριθμός εμπορευματοκιβωτίων για container ships ή Gross Tonnage για επιβατικά πλοία.
- D: Απόσταση που διένυσε το φορτίο στο ταξίδι (nautical mile)

Παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τη MEPC κατά τη 59^η συνεδρίαση τον Ιούλιο του 2009. Σύμφωνα με την απόφαση της MEPC.282(70) αποτελεί ένα εθελοντικό δείκτη για την παρακολούθηση του SEEMP. Όσο πιο μικρές τιμές λαμβάνει τόσο πιο αποδοτική ενεργειακά είναι η λειτουργία του πλοίου.

Τα βασικά στάδια για τον υπολογισμό του είναι: (www.marine-digital.com)

- Καθορισμός της χρονικής περιόδου υπολογισμού του EEOI
- Σχέδιο για τη συλλογή των καταγραφών
- Συλλογή των δεδομένων
- Μετατροπή δεδομένων σε μορφή όπου μπορούν να αξιοποιηθούν
- Υπολογισμός του EEOI

Παρόλο που ο EEOI λαμβάνει υπόψη τόσο τεχνικά όσο και λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός πλοίου, η ανάγκη δημοσιοποίησης ευαίσθητων πληροφοριών αποτελεί το βασικό μειονέκτημα προκειμένου να αποτελέσει έναν υποχρεωτικό δείκτη ενεργειακής απόδοσης για τη ναυτιλία.

5.1.3 Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI)

Ο Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης Υπαρχόντων Πλοίων εκφράζει τις εκπομπές CO₂ προς το μεταφορικό έργο ενός πλοίου. Είναι ίδιος δείκτης με τον EEDI, μόνο που αφορά τα ήδη υπάρχοντα πλοία κατασκευής πριν το 2013.

Έχει τεθεί σε ισχύ από 1/1/2023 για όλα τα πλοία άνω των 400 GT, ενώ μέσω των διατάξεων της απόφασης MEPC.350(78) καθορίζεται ο τρόπος υπολογισμού του εκτιμώμενου EEXI:



$$\begin{aligned}
 \text{EEXI} &= \frac{\left(\prod_{j=1}^n f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + \left(P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right) + \left(\prod_{j=1}^n f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AE_{eff(i)}} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE}}{f_i \cdot f_c \cdot f_i \cdot \text{Capacity} \cdot f_w \cdot V_{ref} \cdot f_m} \\
 &= \frac{\text{CO}_2 \text{ conversion factor} * \text{SFC} * \text{Engine Power}}{\text{Capacity} * \text{EEXI Speed}} \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{tonnes} * \text{nm}} \right)
 \end{aligned}$$

Όπου:

- CO₂ Conversion factor: C_F: Αδιάστατος συντελεστής εκπομπής που αφορά το περιεχόμενο του καυσίμου σε άνθρακα που αποδίδει την ποσότητα CO₂ που εκπέμπεται από την καύση μιας ποσότητας καυσίμου.
- SFC: Κατανάλωση καυσίμου στο 75% MCR για κύρια μηχανή και 50% MCR για ηλεκτρομηχανές.
- Engine Power: Το 75% της εγκατεστημένης ισχύς ή το 83% της περιορισμένης ισχύος λόγω συστήματος περιορισμού της ισχύος της μηχανής ή του άξονα. Επιλέγεται η μικρότερη τιμή εκ των δύο.
- Capacity: Χωρητικότητα του πλοίου
- EEXI Speed: Ταχύτητα σχεδίασης του πλοίου στη μέγιστη κατάσταση φόρτωσης με βαθιά νερά και συνθήκες ήρεμης θάλασσας και απουσίας ανέμου.

Παρακάτω παρουσιάζεται η χρονολογική αλληλουχία του EEXI από την υιοθέτηση του το 2021 μέχρι το 2026 όπου θα πραγματοποιηθεί η αξιολόγηση του. Η επαλήθευση του EEXI για τα ήδη υπάρχοντα γίνεται μετά το 2021 κατά το την ετήσια / ενδιάμεση / ειδική επιθεώρηση για το International Air Pollution Prevention. Κατά το survey θα εκδοθεί επίσης καινούργιο πιστοποιητικό International Energy Efficiency που θα συμπεριλαμβάνει την τιμή του EEXI.

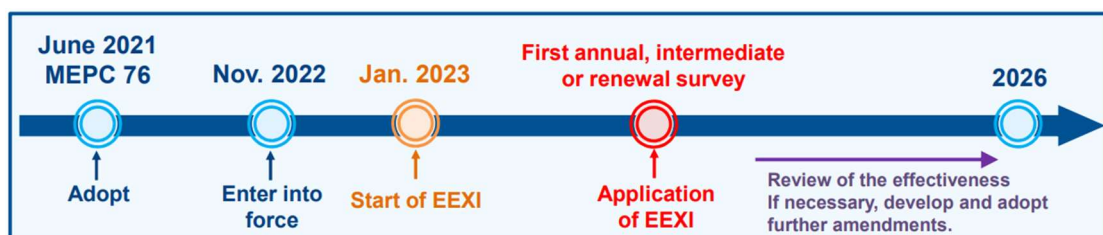


Figure 8: Χρονική σειρά υιοθέτησης, εφαρμογής και αξιολόγησης του EEXI (Nippon Kaiji Kyokai, 2021)



Ο απαιτούμενος (required) EEXI να εξασφαλίζει τα ελάχιστα όρια ενεργειακής απόδοσης ενός πλοίου και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Attained EEXI} \leq \text{Required EEXI} = (1-Y/100) * \text{EEDI Reference Line Value}$$

Όπου:

- Y: Είναι ο συντελεστής μείωσης του EEXI όπως δίνεται από τον παρακάτω πίνακα
- EEDI Reference Line Value: Υπολογίζεται όπως στην περίπτωση του EEDI

$$\text{Reference Line Value} = a*(100\% \text{ deadweight})^c$$

Ship type	Size	Reduction factor
	4,000 and above but less than 20,000 DWT	0-20*
Containership	200,000 DWT and above	50
	120,000 and above but less than 200,000 DWT	45
	80,000 and above but less than 120,000 DWT	35
	40,000 and above but less than 80,000 DWT	30
	15,000 and above but less than 40,000 DWT	20
	10,000 and above but less than 15,000 DWT	0-20*
General cargo ship	15,000 DWT and above	30
	3,000 and above but less than 15,000 DWT	0-30*
Refrigerated cargo carrier	5,000 DWT and above	15
	3,000 and above but less than 5,000 DWT	0-15*
Combination carrier	20,000 DWT and above	20
	4,000 and above but less than 20,000 DWT	0-20*
LNG carrier	10,000 DWT and above	30
Ro-ro cargo ship (vehicle carrier)	10,000 DWT and above	15
Ro-ro cargo ship	2,000 DWT and above	5
	1,000 and above but less than 2,000 DWT	0-5*
Ro-ro passenger ship	1,000 DWT and above	5
	250 and above but less than 1,000 DWT	0-5*
Cruise passenger ship having non-conventional propulsion	85,000 GT and above	30
	25,000 and above but less than 85,000 GT	0-30*

Πίνακας 3: Συντελεστής μείωσης (%) του EEXI σε σχέση με τον EEDI των γραμμών αναφοράς (International Maritime Organization, 2021)



“Διερεύνηση και αξιολόγηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης στη ναυτιλία”

Ship type	Size	Reduction factor
Bulk carrier	200,000 DWT and above	15
	20,000 and above but less than 200,000 DWT	20
	10,000 and above but less than 20,000 DWT	0-20*
Gas carrier	15,000 DWT and above	30
	10,000 and above but less than 15,000 DWT	20
	2,000 and above but less than 10,000 DWT	0-20*
Tanker	200,000 DWT and above	15
	20,000 and above but less than 200,000 DWT	20

Πίνακας 4: Συντελεστής μείωσης (%) του EEXI σε σχέση με τον EEDI των γραμμών αναφοράς (International Maritime Organization, 2021)

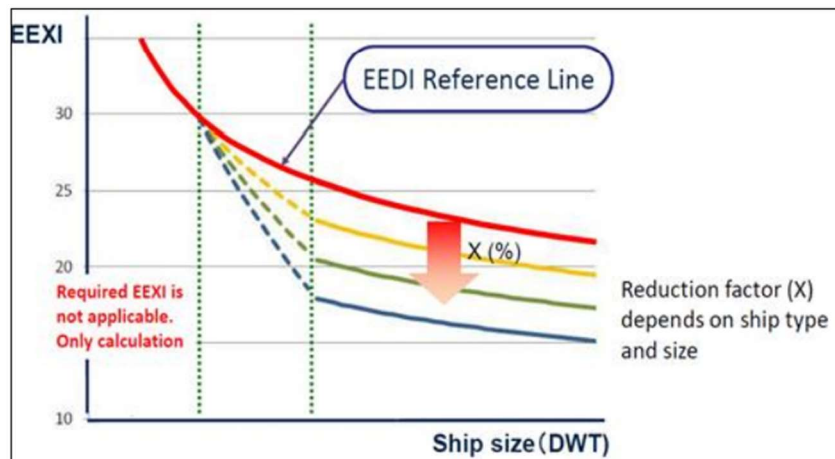


Figure 9: Γραμμές αναφοράς EEXI και EEDI (Nippon Kaiji Kyokai, 2021)

Οι δείκτες EEDI και EEXI δεν φαίνεται να έχουν εκ πρώτης όψεως κάποια διαφορά ως προς τον τύπο υπολογισμού τους και τον τύπο πλοίων που απευθύνονται. Ωστόσο υπάρχουν κάποιες διαφορές οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω:

Ο EEDI απευθύνεται σε καινούργια πλοία ή πλοία που έχουν υποβληθεί σε μετασκευή ή πλοία που έχουν υποβληθεί σε εκτεταμένη μετασκευή που θεωρούνται νεότευκτα, ενώ ο EEXI απευθύνεται για κάθε πλοίο ή για κάθε πλοίο που έχει υποβληθεί σε μεγάλη μετασκευή. Ο ορισμός του «νέου πλοίου» όπως συναντάται στον EEDI αφορά πλοία όπου το συμβόλαιο κατασκευής τους είναι μετά την 1^η Ιανουαρίου 2013, πλοία όπου έχει τοποθετηθεί η τρόπιδα ή είναι σε στάδιο κατασκευής μετά την



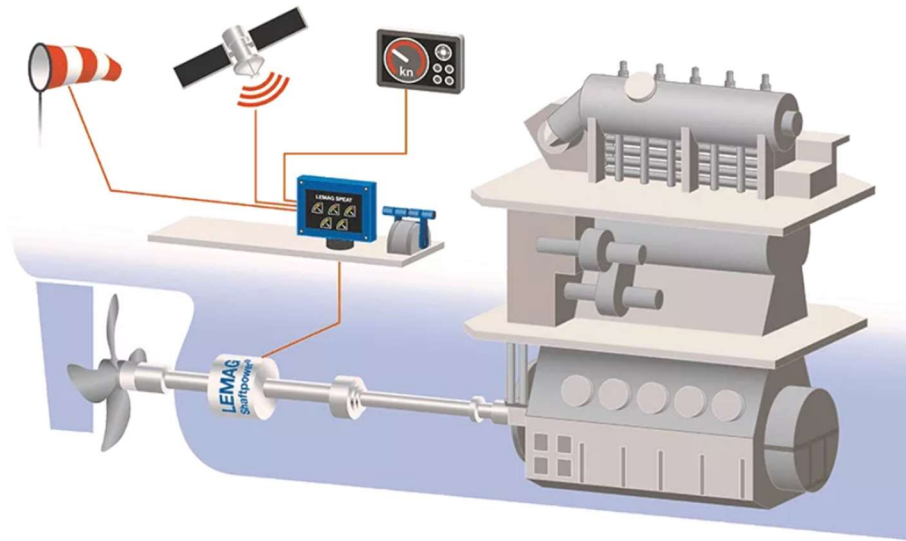
1^η Ιουλίου 2013 και πλοία όπου η παράδοση τους είναι μετά την 1^η Ιουλίου 2015. (International Maritime Organization, 2021)

Σημαντική διαφορά όπως φαίνεται και παραπάνω αποτελεί ο συντελεστής μείωσης, όπου δεν είναι το ίδιο απαιτητικός στον EEXI όπως είναι στον EEDI. Αυτό συμβαίνει επειδή τα πλοία που κατασκευάστηκαν κατά την περίοδο της 1^{ης} Φάσης (2013-2015) μπορούν να συμμορφώνονται ακόμα και με τα αυστηρότερα όρια της 3^{ης} Φάσης (2020-2024).

Η ισχύς της κύριας μηχανής που λαμβάνεται υπόψη αποτελεί ακόμα μία διαφορά μεταξύ των δύο δεικτών. Αν ένα πλοίο περιορίσει την ισχύ της κύριας μηχανής τότε στον EEXI δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιήσει στον τύπο είτε το 83% της περιορισμένης αυτής ισχύς είτε το 75% της εγκατεστημένης ισχύς, ανάλογα ποιο είναι μικρότερο. (International Maritime Organization, 2022) Αντίθετα, στον EEDI, χρησιμοποιείται το 75% της εγκατεστημένης ισχύς, οπότε τα υπάρχοντα πλοία αποκτούν ένα πλεονέκτημα αφού με αυτή τη μεταβλητή πετυχαίνουν καλύτερες τιμές στον EEXI. (International Maritime Organization, 2018)

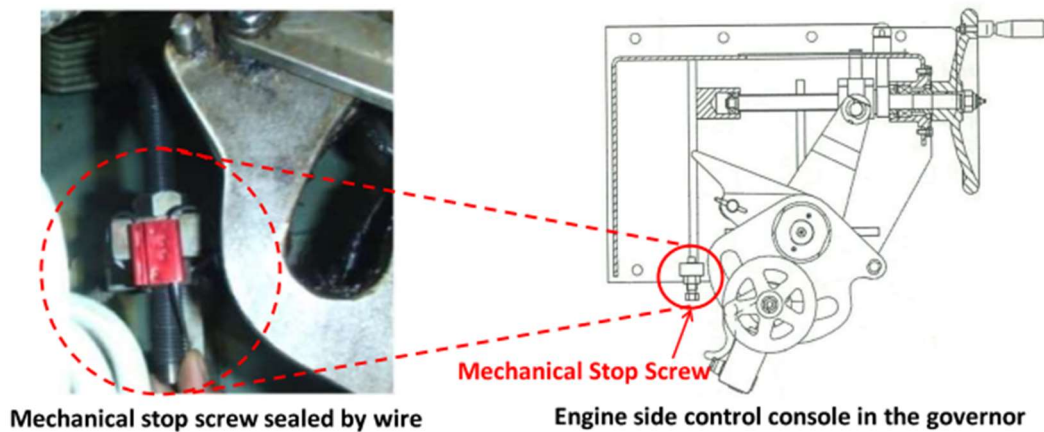
Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, υπάρχει η δυνατότητα περιορισμού της ισχύς με σκοπό τη βελτίωση του EEXI. Κατά την MEPC.335(76), δόθηκε η δυνατότητα στους πλοιοκτήτες να χρησιμοποιήσουν συστήματα για τον περιορισμό της ισχύς στον άξονα (Shaft Power Limitation – ShaPoLi) και της ισχύς της μηχανής (Engine Power Limitation):

Shaft Power Limitation: Το σύστημα για τον περιορισμό της ισχύς από τον άξονα προς την προπέλα περιλαμβάνει την εγκατάσταση αισθητήρων για την καταγραφή της ροπής και της γωνιακής ταχύτητας. Οι καταγραφές γίνονται σε πραγματικό χρόνο και με αυτό τον τρόπο παρακολουθείται αν η ισχύς ξεπεράσει το όριο που έχει τεθεί κατά τον υπολογισμό του EEXI. Σε μερικά συστήματα όταν αυτή η ισχύς φτάσει γύρω στο 5%-10% κάτω από το όριο, τότε υπάρχει προειδοποίηση, ενώ αν ξεπεράσει το όριο τότε ενεργοποιείται ένας συναγερμός προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι κατάλληλες ενέργειες για την επαναφορά κάτω από το όριο.



Εικόνα 1: LEMAG Shaftpower system (Chris Marine, 2022)

Engine Power Limitation: Το σύστημα για τον περιορισμό της ισχύος από την κύρια μηχανή περιλαμβάνει τη χρήση ενός mechanical stop screw για τον περιορισμό των αντλιών τροφοδοσίας πετρελαίου ή για τον περιορισμό του ρυθμιστή στροφών.



Εικόνα 2: Εφαρμογή συστήματος EPL (MEPC 75/15/Add.2, 2021)

Η επεμβατική μέθοδος μείωσης της ισχύος μέσω του συστήματος EPL έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη μείωση της διαθέσιμης ισχύος σε σχέση με το SHaPoLi. Αυτό αποτυπώνεται στα παρακάτω διαγράμματα ισχύος – στροφών.

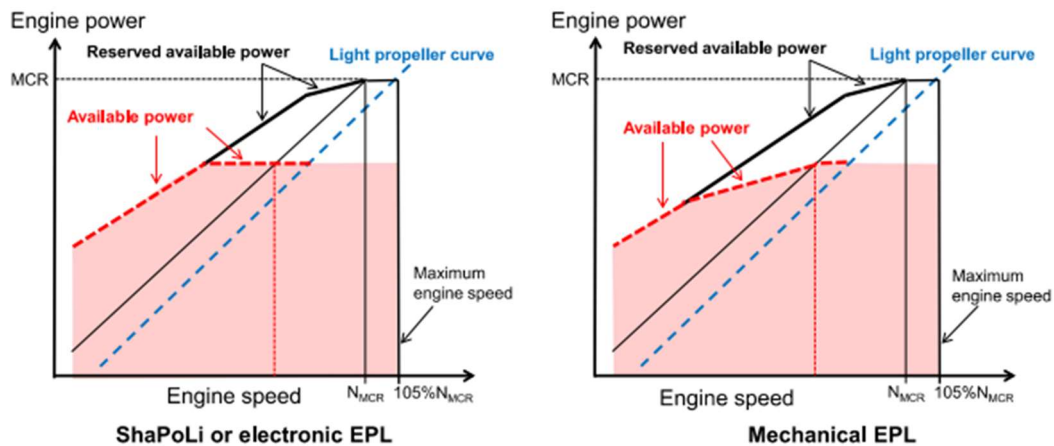


Figure 10: Διαγράμματα ισχύος - στροφών για χρήση SHaPoLi και EPL (MEPC 75/15/Add.2, 2021)

5.1.4 Carbon Intensity Indicator (CII)

Ο Δείκτης Έντασης του Άνθρακα καθίσταται υποχρεωτικός από 1/1/2023 για όλα τα πλοία χωρητικότητας άνω των 5000 GT και υπολογίζει τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα προς το μεταφερόμενο φορτίο ενός πλοίου από 1^η Ιανουαρίου μέχρι 31 Δεκεμβρίου κάθε ημερολογιακού έτους:

$$CII = \frac{FC_j * CF_j}{Capacity * D_t} \left(\frac{g CO_2}{tonnes * nm} \right)$$

Όπου:

- j : Τύπος καυσίμου
- FC_j : Μάζα καυσίμου που καταναλώθηκε στο ταξίδι μέσα σε ένα έτος(tons)
- CF_j : Συντελεστής εκπομπής που αποδίδει τη μάζα CO_2 που εκπέμπεται από την καύση μιας ορισμένης μάζας καυσίμου (tons CO_2 / tons fuel)
- Capacity: Χωρητικότητα του πλοίου
- D_t : Συνολική απόσταση που ταξίδεψε το πλοίο, όπως αναφέρεται στο IMO DCS (nautical miles)



Μέσα σε διάστημα 3 μηνών από όταν ολοκληρωθεί το ημερολογιακό έτος, μέσω των καταγραφών θα υπολογίζεται ο CII και θα αναφέρεται στη Σημεία ή σε άλλον οργανισμό που την εκπροσωπεί.

Ο εκτιμώμενος CII που αναφέρεται παραπάνω, υπολογίζεται για περίοδο 12 μηνών με δεδομένα που συλλέγονται με βάση τον κανονισμό 27 του παραρτήματος VI της MARPOL. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο απαιτούμενος δείκτης CII:

$$\text{Required CII} = \left(1 - \frac{Z}{100}\right) * CII_{ref} \left(\frac{g CO_2}{tonnes * nm}\right)$$

Όπου:

Z: Ο ετήσιος παράγοντας μείωσης για τη διασφάλιση συνεχούς μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και δίνεται από τον παρακάτω πίνακα.

Year	Reduction factor relative to 2019
2023	5%*
2024	7%
2025	9%
2026	11%
2027	- **
2028	- **
2029	- **
2030	- **

Πίνακας 5: Παράγοντας μείωσης Z (MEPC.338(76), 2021)

CII_{ref}: Η γραμμή αναφοράς η οποία δίνεται από τη σχέση CII_{ref}=a*Capacity^c, με τις τιμές a και c να δίνονται από τον Πίνακα 5.



Ship type		Capacity	a	c
Bulk carrier	279,000 DWT and above	279,000	4745	0.622
	less than 279,000 DWT	DWT	4745	0.622
Gas carrier	65,000 and above	DWT	14405E7	2.071
	less than 65,000 DWT	DWT	8104	0.639
Tanker		DWT	5247	0.610
Container ship		DWT	1984	0.489
General cargo ship	20,000 DWT and above	DWT	31948	0.792
	less than 20,000 DWT	DWT	588	0.3885
Refrigerated cargo carrier		DWT	4600	0.557
Combination carrier		DWT	5119	0.622
LNG carrier	100,000 DWT and above	DWT	9.827	0.000
	65,000 DWT and above, but less than 100,000 DWT	DWT	14479E10	2.673
	less than 65,000 DWT	65,000	14779E10	2.673
Ro-ro cargo ship (vehicle carrier)	57,700 GT and above	57,700	3627	0.590
	30,000 GT and above, but less than 57,700 GT	GT	3627	0.590
	Less than 30,000 GT	GT	330	0.329
Ro-ro cargo ship		GT	1967	0.485
Ro-ro passenger ship	Ro-ro passenger ship	GT	2023	0.460
	High-speed craft designed to SOLAS chapter X	GT	4196	0.460
Cruise passenger ship		GT	930	0.383

Πίνακας 6: Παράμετροι για τον καθορισμό των γραμμών αναφοράς (IMO, 2021)

Με βάση της απόκλιση που έχει ο απαιτούμενος με τον εκτιμώμενο CII, γίνεται ταξινόμηση των πλοίων στις κατηγορίες A, B, C, D και E. Πλοία τα οποία είναι για τρεις συνεχόμενες χρονιές στην κατηγορία D ή έστω μία χρονιά στην κατηγορία E, θα πρέπει να αναπτύξουν ένα πλάνο που θα περιέχει διορθωτικές ενέργειες. Αυτό το πλάνο θα συμπεριλαμβάνεται στο SEEMP και θα αξιολογείται από τη Σημαία ή άλλον εξουσιοδοτημένο οργανισμό. (International Maritime Organization, 2021)

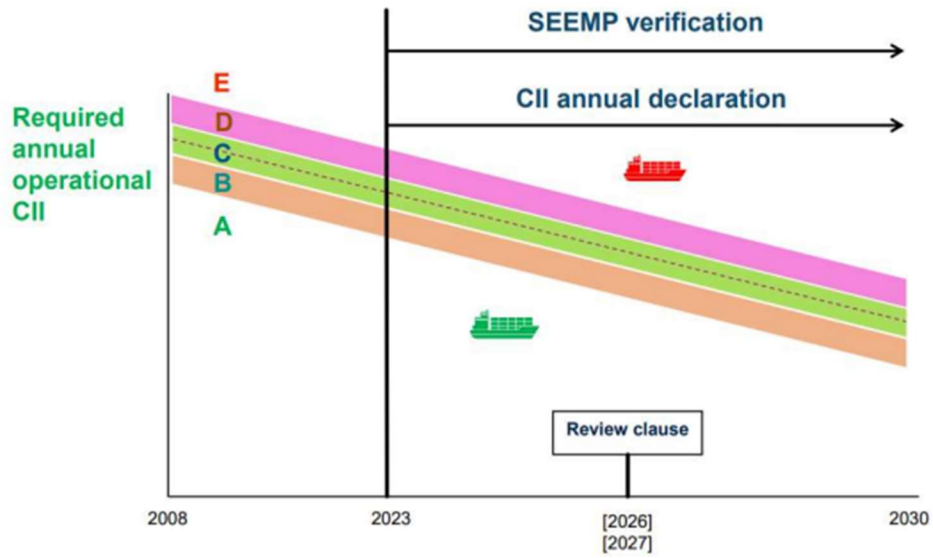


Figure 11: Ταξινόμηση των πλοίων ανάλογα του εκτιμώμενου CII (HKJB & HKIMT, 2021)

Για την κάθε κατηγορία που αναφέρεται παραπάνω, υπάρχει ένα εύρος τιμών το οποίο υπολογίζεται μέσω παλινδρόμησης:

$$\text{superior boundary} = \exp(d_1) \cdot \text{required CII}$$

$$\text{lower boundary} = \exp(d_2) \cdot \text{required CII}$$

$$\text{upper boundary} = \exp(d_3) \cdot \text{required CII}$$

$$\text{inferior boundary} = \exp(d_4) \cdot \text{required CII}$$

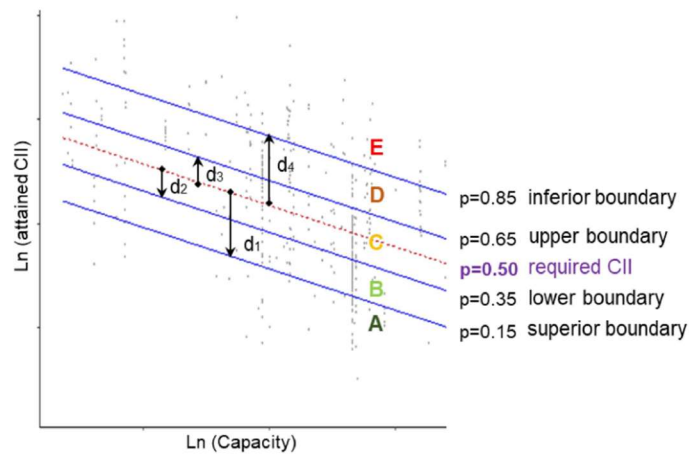


Figure 12: Διάγραμμα εκτιμώμενου CII - χωρητικότητας (MEPC.353(78), 2022)



Με τις τιμές των εκθετικών διανυσμάτων να λαμβάνονται από τον παρακάτω πίνακα, ανάλογα των τύπο του πλοίου.

Ship type		Capacity in CII calculation	dd vectors (after exponential transformation)			
			exp(d1)	exp(d2)	exp(d3)	exp(d4)
Bulk carrier		DWT	0.86	0.94	1.06	1.18
Gas carrier	65,000 DWT and above	DWT	0.81	0.91	1.12	1.44
	less than 65,000 DWT	DWT	0.85	0.95	1.06	1.25
Tanker		DWT	0.82	0.93	1.08	1.28
Container ship		DWT	0.83	0.94	1.07	1.19
General cargo ship		DWT	0.83	0.94	1.06	1.19
Refrigerated cargo carrier		DWT	0.78	0.91	1.07	1.20
Combination carrier		DWT	0.87	0.96	1.06	1.14
LNG carrier	100,000 DWT and above	DWT	0.89	0.98	1.06	1.13
	less than 100,000 DWT		0.78	0.92	1.10	1.37
Ro-ro cargo ship (vehicle carrier)		GT	0.86	0.94	1.06	1.16
Ro-ro cargo ship		DWT	0.66	0.90	1.11	1.37
Ro-ro passenger ship		GT	0.72	0.90	1.12	1.41
Cruise passenger ship		GT	0.87	0.95	1.06	1.16

Πίνακας 7: Τιμές των διανυσμάτων ανάλογα με τον τύπο πλοίου (MEPC.338(76), 2021)

5.1.5 Energy Efficiency per Service Hour (EESH)

Ο Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης ανά Ώρα Υπηρεσίας χρησιμοποιεί τις ώρες λειτουργίας για να υποδηλώσει το μεταφορικό έργο και δίνεται από τον τύπο:

$$EESH = \frac{FC_j * CF_j}{SH} \left(\frac{\text{tonnes } CO_2}{\text{Hour}} \right)$$

Όπου:

- j: Τύπος καυσίμου
- FC_j: Μάζα καυσίμου που καταναλώθηκε στο ταξίδι μέσα σε ένα έτος(tons)
- CF_j: Συντελεστής εκπομπής που αποδίδει τη μάζα CO₂ που εκπέμπεται από την καύση μιας ορισμένης μάζας καυσίμου (tons CO₂ / tons fuel)



- SH: Ώρες λειτουργίας

Ο EESH δεν λαμβάνει υπόψη τη χωρητικότητα ή το μεταφερόμενο φορτίο. Αποτελεί ένα δείκτη όπου η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα μπορούσαν να μειώσουν σε μεγάλο βαθμό τις τιμές του και να θέσουν ως ένα σημείο αναφοράς για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. (ICS, et al., 2018)

Λαμβάνει υπόψη τις ώρες λειτουργίες κατά την πλεύση με φορτίο ή σε κατάσταση ερματισμού, καθώς και τις ώρες λειτουργίας που καταγράφονται κατά τους ελιγμούς. (Panagakos, et al., 2019)

5.1.6 Individual Ship Performance Indicator (ISPI)

Ο Ατομικός Δείκτης Απόδοσης του Πλοίου προτάθηκε από την MEPC.65/4/30 και χρησιμοποιεί την απόσταση που διανύει το πλοίο για παραγόμενο έργο. Υπολογίζεται ως εξής: (Panagakos, et al., 2019)

$$ISPI = \frac{FC_j * CF_j}{D} \left(\frac{\text{tonnes } CO_2}{nm} \right)$$

Όπου:

- j: Τύπος καυσίμου
- FC_j: Μάζα καυσίμου που καταναλώθηκε στο ταξίδι μέσα σε ένα έτος(tons)
- CF_j: Συντελεστής εκπομπής που αποδίδει τη μάζα CO₂ που εκπέμπεται από την καύση μιας ορισμένης μάζας καυσίμου (tons CO₂ / tons fuel)
- D: Διανυόμενη απόσταση (nautical miles)

Όπως στον EESH έτσι και στον ISPI παρατηρείται ότι ο δείκτης δεν λαμβάνει υπόψη τη χωρητικότητα ή τη μάζα του μεταφερόμενου φορτίου. (ICS, et al., 2018)

5.1.7 Existing Vessel Design Index (EVDI)

Ο Δείκτης Σχεδιαστικής Απόδοσης Υπαρχόντων Πλοίων δημιουργήθηκε από τη Rightship με σκοπό να καλύψει το κενό που άφηγε ο EEDI σχετικά με τον υπολογισμό της έκλυσης διοξειδίου του άνθρακα ανά τονομία στα υπάρχοντα πλοία.



Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω δείκτες, η Rightship έχει δημιουργήσει μία ταξινόμηση που σχετίζεται με την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου από τα πλοία. Μέσω αυτής της ταξινόμησης πετυχαίνει τη σύγκριση πλοίων με ίδιο τύπο και μέγεθος όπου με το χαρακτηρισμό “A” είναι τα πιο αποδοτικά ενώ με το χαρακτηρισμό “G” τα λιγότερο αποδοτικά. (www.rightship.com)

GHG Rating	G	F	E	D	C	B	A
Size score	≤ -2.0	> -2.0	> -1.0	> -0.5	> 0.5	> 1.0	> 2.0
Area under curve	2.5%	13.5%	16%	36%	16%	13.5%	2.5%

Πίνακας 8: Ταξινόμηση των πλοίων με βάση την αξιολόγηση τους για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Rightship, 2022)

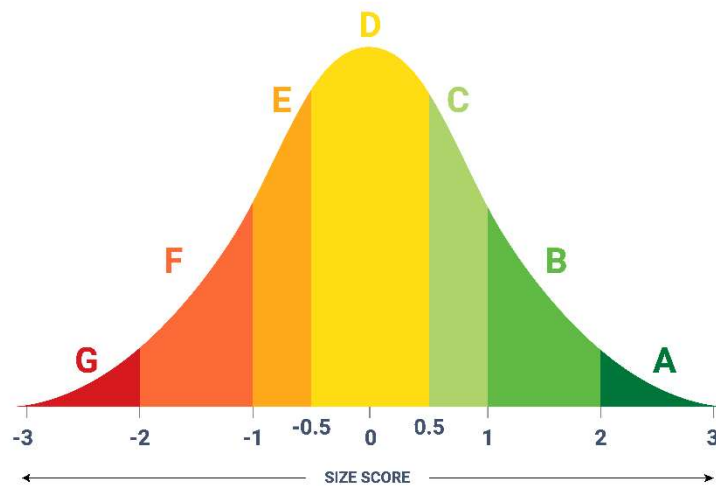


Figure 13: Καμπύλη Gauss (Rightship, 2022)

Ο EVDI είναι παρόμοιος με τον καινούργιο δείκτη ενεργειακής απόδοσης EEXI. Βασική διαφορά μεταξύ των δύο δεικτών είναι στο κατά πόσο λαμβάνουν υπόψη την εγκατεστημένη ισχύ στον υπολογισμό τους. Συγκεκριμένα, ο EVDI αγνοεί το κομμάτι



που σχετίζεται με περιορισμένο της ισχύς, με αποτέλεσμα ο EEXI να λαμβάνει χαμηλότερες τιμές. (DNV, 2022)

Επίσης, η ταξινόμηση που παρέχει ο EVDI είναι παρόμοια με αυτή του CII, με τη διαφορά ότι σχετίζεται με τα τεχνικά στοιχεία του πλοίου. Στόχος της Rightship είναι να ενσωματώσει τα στοιχεία που λαμβάνονται από τους δείκτες EVDI, EEXI και CII προκειμένου να βοηθήσει τους ναυλωτές και τους πλοιοκτήτες στην επιλογή / σωστή λειτουργία του πλοίου τους προκειμένου να πετύχουν τους περιβαλλοντικούς, κοινωνικούς και πολιτικούς στόχους τους (Environmental, Social and Governance – ESG). (Rightship, 2022)

5.2 Επιμέρους δείκτες ενεργειακής απόδοσης

Τα συστήματα που βρίσκονται στο πλοίο μπορούν να μελετηθούν ξεχωριστά προκειμένου να διερευνηθεί ο περιβαλλοντικός τους αντίκτυπος. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά μεγέθη για την παρακολούθηση αυτών των συστημάτων. Ο βασικός διαχωρισμός τους γίνεται στις εξής κατηγορίες:

- Κινητήρες πρόωσης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- Συστήματα θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού
- Αντλίες
- Εναλλάκτες θερμότητας
- Αεροσυμπιεστές

Αξίζει να σημειωθεί ότι το είδος και το πλήθος των καταναλωτών, που εμπίπτουν στις παραπάνω κατηγορίες, εξαρτάται από την κατάσταση λειτουργίας του πλοίου. Οι τρεις χαρακτηριστικές καταστάσεις του πλοίου είναι η κανονική πορεία, οι χειρισμοί και εν όρμω. (Φραγκόπουλος & Προυσαλίδης, 2019)



5.2.1 Κινητήρες πρόωσης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Οι κινητήρες στο πλοίο παίζουν σημαντικό ρόλο τόσο στην πρόωση όσο και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία των υπόλοιπων συστημάτων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα μεγέθη της ειδικής κατανάλωσης και του μηχανικού βαθμού απόδοσης, τα οποία μπορούν να προσδιορίσουν την ενεργειακή αποδοτικότητα των κινητήρων.

5.2.1.1 Specific Fuel Oil Consumption (SFOC)

Η ειδική κατανάλωση καυσίμου αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό ενός κινητήρα και υπολογίζεται ως εξής:

$$SFOC = \frac{\dot{m}_{FUEL}}{P} \left(\frac{g}{kW * H} \right)$$

Όπου:

\dot{m}_{FUEL} : Παροχή καυσίμου (g/H)

P: Ισχύς του κινητήρα (kW)

Σε χαμηλές στροφές περιστροφής, κάθε κύκλος διαρκεί περισσότερο χρόνο με αποτέλεσμα να υπάρχει περισσότερος διαθέσιμος χρόνος για συναλλαγή θερμότητας κάτι που προκαλεί αύξηση των απωλειών θερμότητας. Συνεπώς, με τη μείωση των στροφών περιστροφής του κινητήρα να αυξάνεται η πραγματική ειδική κατανάλωσης καυσίμου.

Στις υψηλές στροφές μεγαλώνουν οι απώλειες τριβών (εξαρτώνται κυρίως από την ταχύτητα) και αλλά ταυτόχρονα αυξάνονται και οι ταχύτητες του ρευστού, το οποίο προκαλεί περισσότερες απώλειες τριβών. Επομένως με αύξηση των στροφών περιστροφής του κινητήρα, αυξάνεται η πραγματική ειδική κατανάλωση καυσίμου και μειώνεται ο ογκομετρικός βαθμός απόδοσης του κινητήρα.

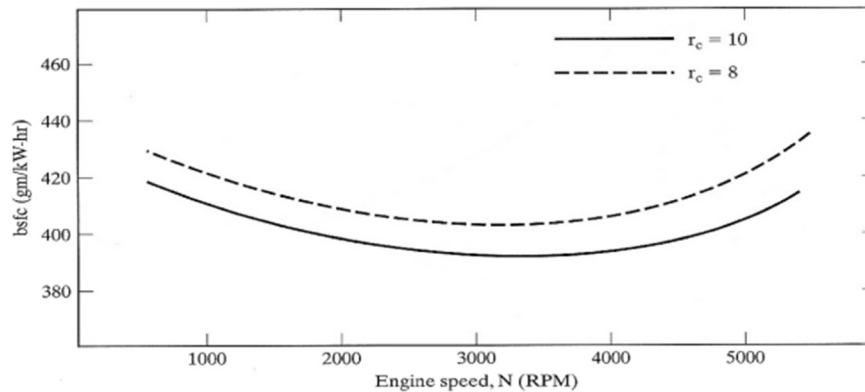


Figure 14: Πραγματική ειδική κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει των στροφών και του βαθμού συμπίεσης

5.2.1.2 Mechanical Efficiency (η_m)

Στους εμβολοφόρους κινητήρες, λόγω της συμπίεσης του εργαζόμενου μέσου στο θάλαμο καύσης, προκαλείται εκτόνωση των καυσαερίων με αποτέλεσμα την παραγωγή έργου. Το έργο που παράγεται χαρακτηρίζεται ως ενδεικνύμενο, ενώ το πραγματικό έργο είναι αυτό που προκύπτει όταν αφαιρεθούν από το ενδεικνύμενο έργο οι μηχανικές απώλειες και οι απώλειες λόγω βοηθητικών μηχανημάτων.

Έτσι, ο λόγος του πραγματικού έργου προς του ενδεικνύμενου οδηγεί στον υπολογισμό του μηχανικού βαθμού απόδοσης:

$$\eta_m = \frac{W_b}{W_i}$$

Ο μηχανικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται όσο μειώνονται οι στροφές περιστροφής του κινητήρα. Στην περίπτωση που ο κινητήρας λειτουργεί χωρίς φορτίο (στο ρελαντί) ο μηχανικός βαθμός απόδοσης είναι 0 (ή κοντά στο 0) επειδή το έργο που παράγεται καταναλώνεται για την κίνηση των βοηθητικών μηχανημάτων του κινητήρα. Οι μηχανικές απώλειες και οι απώλειες λόγω κίνησης ρευστών είναι οι απώλειες που κυριαρχούν στην περιοχή των υψηλών στροφών του κινητήρα (μεγάλες ταχύτητες στα σημεία επαφής μεταλλικών επιφανειών και μεγάλες ταχύτητες ρευστού), ενώ στην περιοχή χαμηλών στροφών κυριαρχούν οι απώλειες λόγω συναλλαγής θερμότητας (κάθε κύκλος διαρκεί περισσότερο χρόνο).



5.2.2 Συστήματα θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού HVAC

Το σύστημα θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού αποτελεί μια σημαντική πηγή κατανάλωσης ενέργειας για το πλοίο. Ιδιαίτερα για τα επιβατηγά πλοία, οι ανάγκες ενέργειας του συστήματος μπορεί να φτάσουν μέχρι και το 30% της συνολικής ενέργειας που δαπανάται. (<https://new.abb.com/marine/energy-efficiency/hvac>).

Το HVAC είναι ένα ενιαίο σύστημα το οποίο μπορεί να υποδιαιρεθεί σε υποκατηγορίες, υποσυστήματα και στον εξοπλισμό που απαρτίζουν τα υποσυστήματα. Οι βασικές υποκατηγορίες σχετίζονται με την υπηρεσία που μπορούν να προσφέρουν και αυτές είναι η θέρμανση, η ψύξη και ο εξαερισμός.

Αντίστοιχα, η κάθε υποκατηγορία μπορεί να υποδιαιρεθεί περαιτέρω με βάση τα υποσυστήματα που την απαρτίζουν, φτάνοντας στο τέλος στην ανάλυση των υποσυστημάτων για τον προσδιορισμό των καταναλωτών και την παρακολούθηση του βαθμού απόδοσης τους.

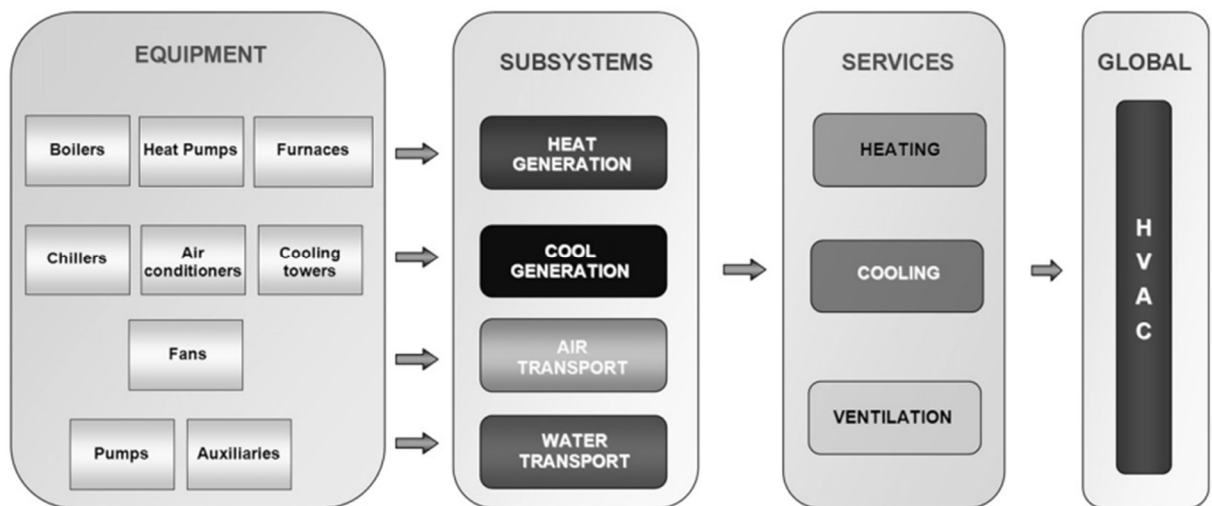


Figure 15: Υποδιαίρεση του συστήματος HVAC (Perez-Lombard, et al., 2011)



5.2.2.1 Υποσύστημα παραγωγής θερμότητας

Ένα από τα βασικότερα στοιχεία αυτού του υποσυστήματος αποτελούν οι ναυτικοί ατμολέβητες οι οποίοι παράγουν θερμό νερό ή ατμό με χρήση θερμότητας προερχόμενη από τα καυσαέρια.

Σημαντικό μέτρο παρακολούθησης της ενεργειακής απόδοσης του ναυτικού ατμολέβητα αποτελεί ο θερμικός βαθμός απόδοσης: (Φραγκόπουλος & Προυσαλίδης, 2019)

$$n_B = \frac{Q_i - Q_l}{Q_i}$$

Όπου:

Q_i : Θερμότητα που δίνεται στο λέβητα

Q_l : Απώλειες θερμότητας από το λέβητα οι οποίες διαχωρίζονται σε απώλειες θερμότητας με τα καυσαέρια και σε άδηλες απώλειες

Όσο μεγαλύτερος ο βαθμός απόδοσης τόσο πιο αποδοτικός είναι ο λέβητας. Σε παλαιότερους λέβητες ο βαθμός απόδοσης κυμαινόταν μεταξύ 60% με 70%. Σήμερα οι λέβητες είναι εφοδιασμένοι με συσκευές ανάκτησης θερμότητας με αποτέλεσμα ο βαθμός απόδοσης να φτάνει το 94%. (Δανιήλ & Μιμηκόπουλος, 2002)

Επίσης, σημαντικές είναι και οι αντλίες θερμότητας στις οποίες προσδιορίζεται ο βαθμός απόδοσης τους μέσω του συντελεστή συμπεριφοράς (Coefficient of Performance).

Ο συντελεστής συμπεριφοράς μιας αντλίας θερμότητάς κατά τη λειτουργία της για θέρμανση ενός χώρου δίνεται από τη σχέση:

$$COP = \frac{Q_\theta}{W_{in}}$$

Όπου:

Q_θ : η αποδιδόμενη θερμική ισχύς από την αντλία θερμότητας σε kW.



W_{in} : η καταναλισκόμενη ισχύς από το συμπιεστή, τους ανεμιστήρες, τους αυτοματισμούς κ.τ.λ. της αντλίας θερμότητας σε kW.

Όπως με το λόγο ενεργειακής απόδοσης, έτσι και με το συντελεστή συμπεριφοράς, όσο πιο υψηλές τιμές λαμβάνει τόσο μεγαλύτερη η εξοικονόμηση ενέργειας. Σε εποχιακό επίπεδο μπορεί να φθάσει ακόμα το 5,5. (Κατσαπρακάκης & Μονιάκης, 2015)

5.2.2.2 Υποσύστημα παραγωγής ψύξης

Όταν οι αντλίες θερμότητας χρησιμοποιούνται για ψύξη, τότε ο λόγος ενεργειακής τους απόδοσης δίνεται από τη σχέση:

$$EER = \frac{Q_{\psi}}{W_{in}}$$

Όπου:

- Q_{ψ} : η αποδιδόμενη ψυκτική ισχύς από την αντλία θερμότητας σε kW.
- W_{in} : η καταναλισκόμενη ισχύς από το συμπιεστή, τους ανεμιστήρες, τους αυτοματισμούς κ.τ.λ. της αντλίας θερμότητας σε kW.

Μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνεται όταν ο λόγος ενεργειακής απόδοσης λαμβάνει μεγάλες τιμές. Χαρακτηριστικά, οι σύγχρονες αντλίες θερμότητας μπορεί να έχουν EER που φτάνει το 8,5. (Κατσαπρακάκης & Μονιάκης, 2015)

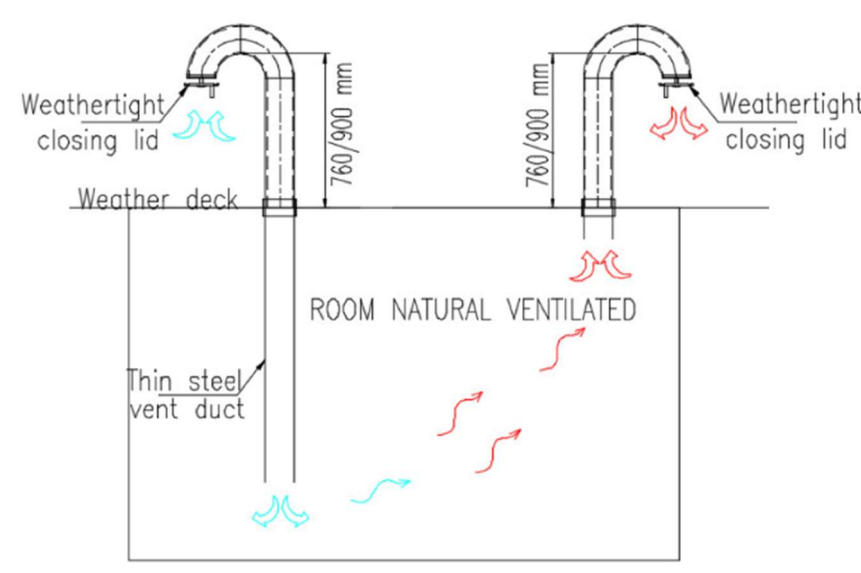
5.2.2.3 Υποσύστημα μεταφοράς αέρα

Τα συστήματα εξαερισμού στα πλοία έχουν διαφορετικές απαιτήσεις ανάλογα με το χώρο που καλύπτουν και τον τύπο του πλοίου. Έτσι, υπάρχει ένας διαχωρισμός στα



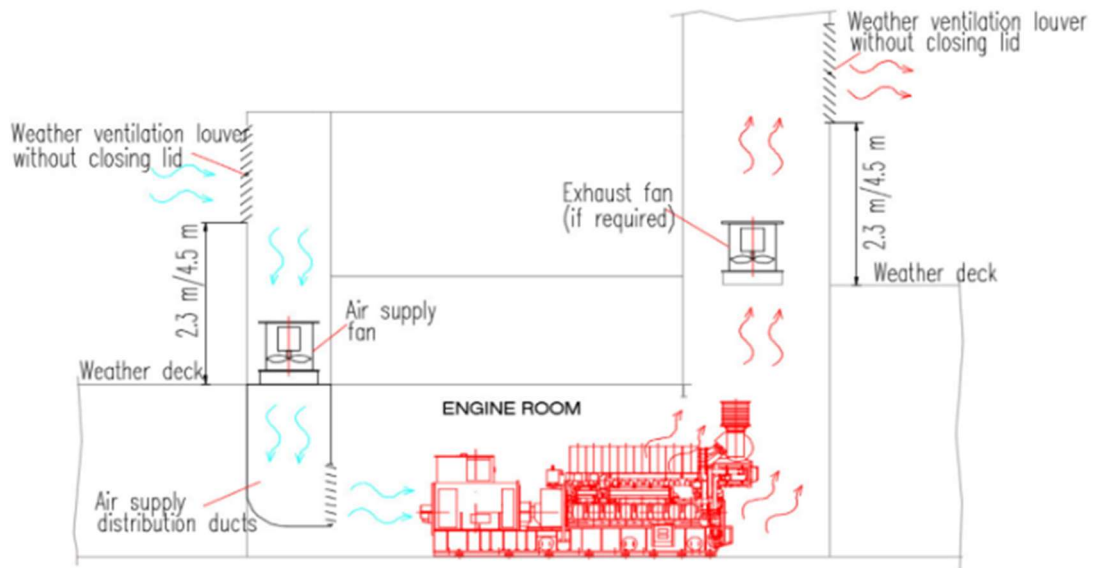
διαμερίσματα των πλοίων ανάλογα με τον τρόπο που παρέχεται ο εξαερισμός: (Mihai & Rusu, 2021)

- Φυσικός εξαερισμός: Συναντάται σε διαμερίσματα χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις για τη λειτουργία του εξοπλισμού ή στην ασφάλεια του πλοίου και των επιβατών. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, τα ανοίγματα του εξαερισμού βρίσκονται πάνω από στο κυρίως κατάστρωμα, με ελάχιστο ύψος τα 900 mm.



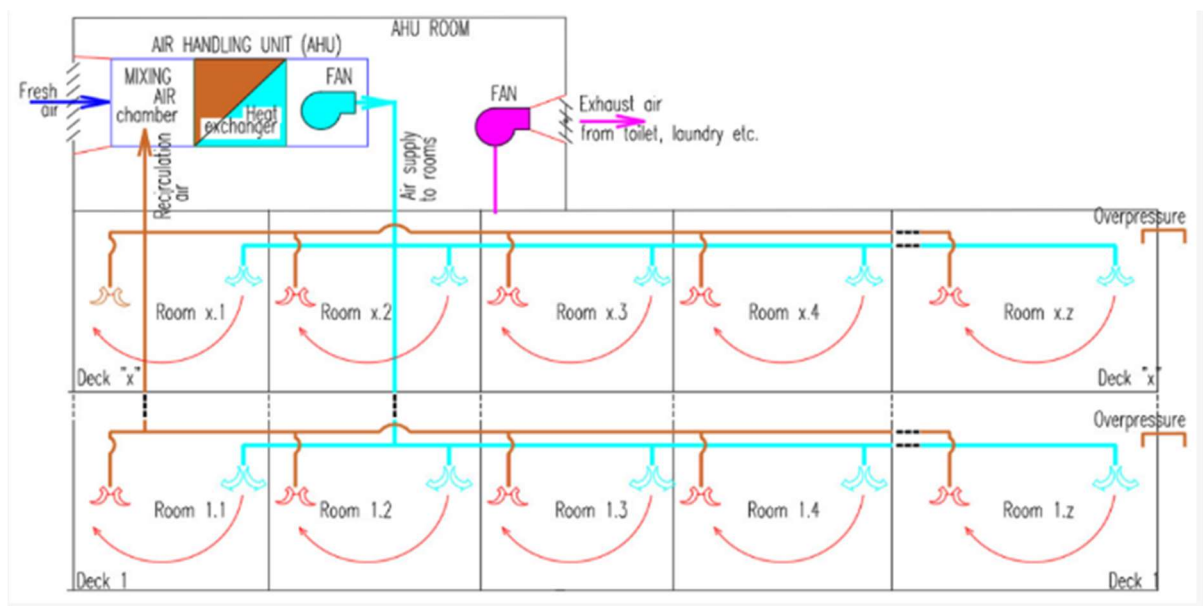
Εικόνα 3: Σύστημα φυσικού αερισμού (Mihai & Rusu, 2021)

- Μηχανικός εξαερισμός: Αυτός ο τύπος εξαερισμού συναντάται στα τεχνικά διαμερίσματα και στα διαμερίσματα των φορτίων. Αποτελείται από ανεμιστήρες που παρέχουν αέρα σε αυτούς τους χώρους και από ανεμιστήρες που σχετίζονται με την απομάκρυνση εύφλεκτων αερίων που μπορεί να συγκεντρωθούν στο χώρο. Επίσης, οι ανεμιστήρες ψύχουν τους χώρους και διατηρούν σταθερή την πίεση του.



Εικόνα 4: Διάταξη εξαερισμού στο χώρο μηχανοστασίου (Mihai & Rusu, 2021)

- Μηχανικός εξαερισμός με συνδυασμό συστήματος κλιματισμού: Ο εξαερισμός τέτοιου τύπου συναντάται συνήθως στους χώρους ενδιαίτησης προκειμένου να υπάρχει θέρμανση ή ψύξη του χώρου, ενώ παράλληλα διασφαλίζεται η παροχή καθαρού αέρα. Αξίζει να αναφερθεί ότι σημαντική συμβολή σε όλη αυτή τη διαδικασία έχει η μονάδα διαχείρισης αέρα από την οποία περνάει ο αέρας για να επανακυκλοφορήσει στους χώρους.



Εικόνα 5: Διάταξη μηχανικού εξαερισμού με σύστημα κλιματισμού (Mihai & Rusu, 2021)



Ο βαθμός απόδοσης του ανεμιστήρα προκύπτει από το παρακάτω πηλίκο:

$$n_{FAN} = \frac{\text{Ισχύς αέρα}}{\text{Ισχύς προσδιδόμενης ενέργειας}}$$

Πλήθος μεταβλητών όπως είναι ο τύπος του ανεμιστήρα, η παροχή, η ταχύτητα και το μέγεθος του στροφείου μπορούν να επηρεάσουν το βαθμό απόδοσης. Μέσα σε αυτά τα πλαίσια αξίζει να αναφερθεί πως η Air Movement and Control Association International (AMCA) μαζί με την American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) δημιούργησαν μία κλίμακα για την ενεργειακή κατάταξη των ανεμιστήρων με βάση την μέγιστη απόδοσή τους και τη διάμετρο του στροφείου.

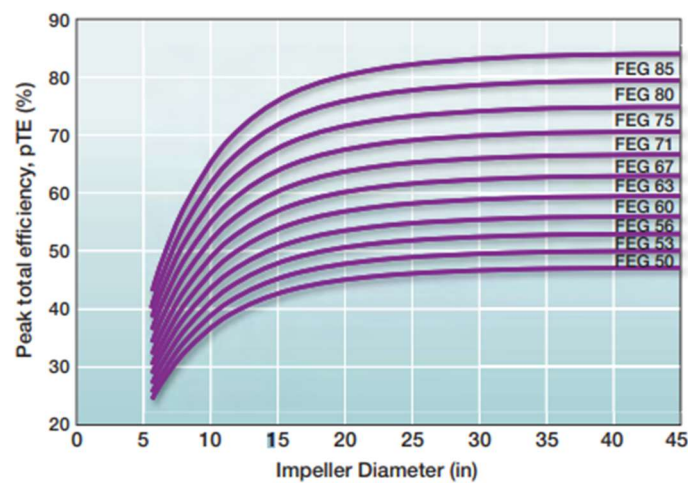


Figure 16: Διάγραμμα με καμπύλες κατάταξης της απόδοσης του ανεμιστήρα – Fan Energy Grade (Brendel, 2010)

Αν για παράδειγμα ένας ανεμιστήρας έχει διάμετρο στροφείου 15 ίντσες και μέγιστο βαθμό απόδοσης 71%, τότε ο FEG θα είναι 80.



5.2.3 Αντλίες

Αποτελούν τα μηχανικά μέσα με τη χρήση των οποίων μεταφέρεται μια ποσότητα υγρού από ένα χώρο χαμηλής πίεσης σε χώρο υψηλής πίεσης ή από μία υψομετρική στάθμη σε μια άλλη υψηλότερη. Οι αντλίες τοποθετούνται μεταξύ των σημείων παραλαβής και των σημείων αποστολής του υγρού, το οποίο διακινείται μέσω σωληνώσεων. Οι βασικοί τύποι αντλιών είναι οι δυναμικές αντλίες και οι αντλίες θετικής εκτοπίσεως, οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω.

Στις δυναμικές αντλίες ο υγρό υφίσταται μεταβολή της κινητικής του κατάστασης λόγω πρόσδοσης ορμής σε αυτό από το κινούμενο στοιχείο της αντλίας. Το αποτέλεσμα είναι να αυξηθεί η κινητική ενέργεια του υγρού η οποία μετέπειτα μετατρέπεται σε στατική πίεση. Όπως γίνεται αντιληπτό, αυτός ο τύπος αντλιών επηρεάζεται από την αντίσταση που παράγεται κατά τη κίνηση του υγρού μέσα στις σωληνώσεις. Έτσι, είναι κατάλληλες για διακίνηση υγρών χαμηλού ιξώδους με παροχές που φτάνουν υψηλές τιμές, ενώ βασικό μειονέκτημα είναι ο χαμηλός βαθμός απόδοσης για μικρή παροχή και μεγάλη πίεση.

Στις αντλίες θετικής μετατοπίσεως, το αντλητικό στοιχείο της αντλίας δέχεται μια ποσότητα υγρού η οποία παγιδεύεται εντός θαλάμου και τη μετατοπίζει στο χώρο αυξάνοντας τη στατική πίεση του υγρού, χωρίς να μεταβάλλει την κινητική ενέργεια. Σημαντικό στοιχείο αυτών των αντλιών είναι ότι η παροχή τους είναι ανεξάρτητη από την υδραυλική αντίσταση. Έτσι, οι αντλίες θετικής εκτόπισης είναι κατάλληλες για ανάπτυξη υψηλής πίεσης και μικρής παροχής. Ένα βασικό πλεονέκτημα, πέρα της υψηλής πίεσης, είναι ότι μέσω αυτών των αντλιών μπορούν να διακινηθούν υγρά με μεγάλο ιξώδες. (Παπαϊωάννου, 2002)

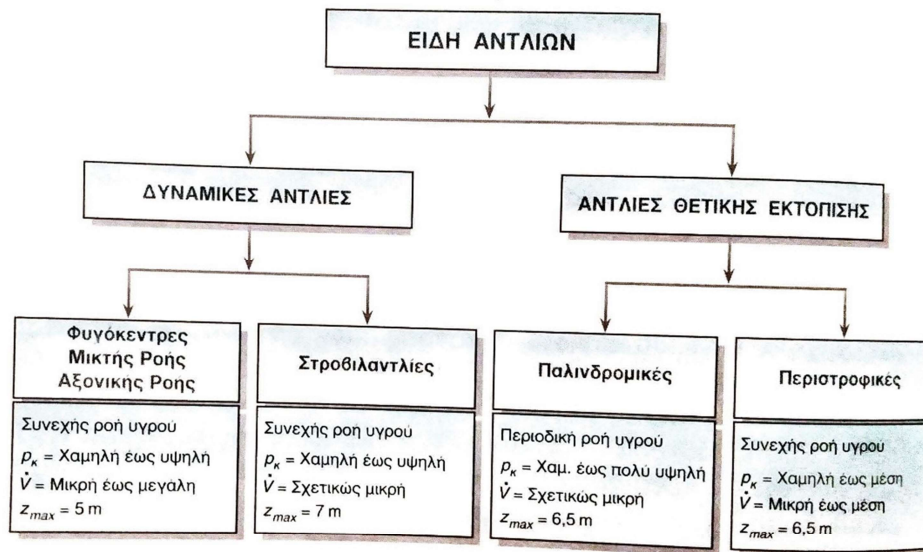


Figure 17: Ταξινόμηση και χαρακτηριστικά λειτουργίας αντλιών (p_k = πίεση κατάθλιψης, V = παροχή και z_{max} = μέγιστο ύψος αναρρόφησης) (Παπαϊωάννου, 2002)

Ο ολικός βαθμός απόδοσης μιας αντλίας δίνεται από το πηλίκο της υδραυλικής ισχύος προς την αξονική ισχύ:

$$\eta_p = \frac{P_w}{P_s}$$

Όπου:

P_w : Υδραυλική ισχύς, δηλαδή η ισχύς που μεταφέρεται τελικώς στο υγρό από την αντλία και δίνεται από την εξίσωση: $P_w = \gamma * V * h_p$ όπου γ ειδικό βάρος υγρού, V παροχή και h_p ολικό μανομετρικό ύψος αντλίας

P_s : Αξονική ισχύς, δηλαδή η ισχύς που μεταφέρεται στον άξονα της αντλίας από τον κινητήρα και υπολογίζεται από τη σχέση $P_s = \eta_k * P_k$ όπου η_k βαθμός απόδοσης κινητήρα και P_k η ισχύς του κινητήρα.

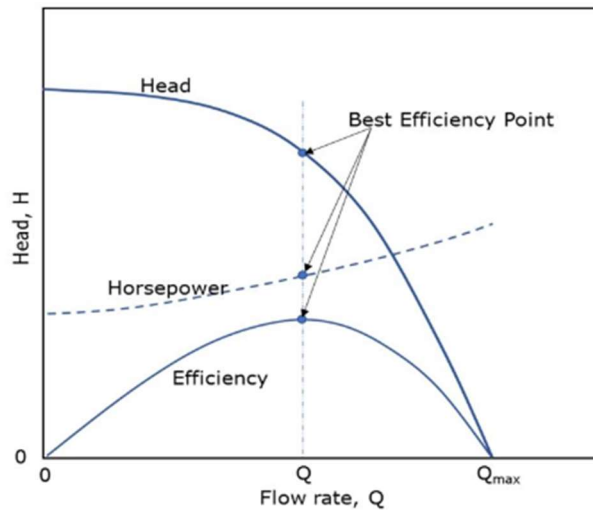
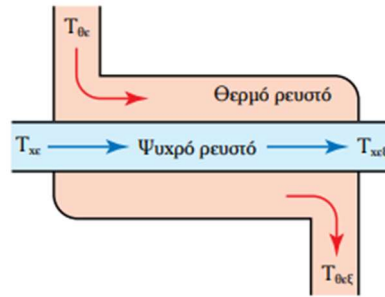


Figure 18: Διάγραμμα χαρακτηριστικών καμπύλων φυγοκεντρικής αντλίας (πηγή: (Ahmari & Kabir, 2017))

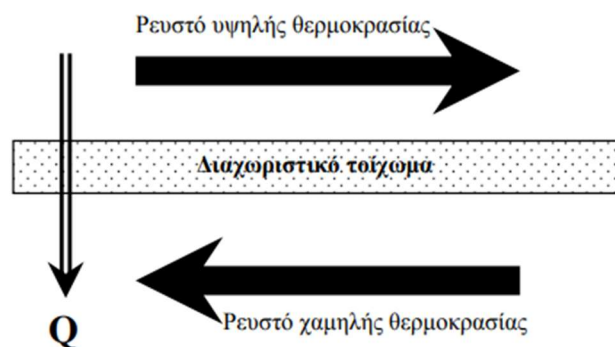
5.2.4 Εναλλάκτες θερμότητας

Οι εναλλάκτες θερμότητας έχουν μεγάλη εφαρμογή στα πλοία. Χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ δύο ρευστών. Έτσι, μπορούν να αυξήσουν τη θερμοκρασία ενός ρευστού, να τη μειώσουν, να συμπυκνώσουν τους ατμούς ή να το φέρουν στο σημείο βρασμού του. Παρακάτω παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των εναλλακτών θερμότητας:

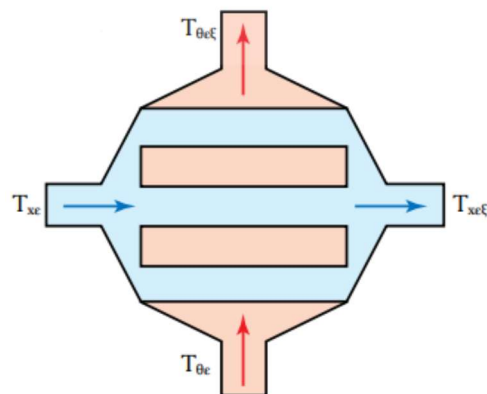
- Εναλλάκτες αναμείξεως ή εξ επαφής: Τα ρευστά έρχονται σε επαφή και αναμειγνύονται.
- Εναλλάκτες επιφάνειας: Υπάρχει διαχωρισμός των ρευστών και ανάλογα τη ροής τους διαχωρίζονται περαιτέρω σε εναλλάκτες παράλληλης ροής ή ομοροής, εναλλάκτες αντίθετης ροής ή αντιρροής και στους εναλλάκτες σταυρωτής ή κάθετης ροής. (Δαγκίνης & Γλύκας, 2017)



Εικόνα 6: Παράλληλη ροή ρευστών (Δαγκίνης & Γλύκας, 2017)



Εικόνα 7: Αντίθετη ροή ρευστών (Καραπάντσιος, 2022)



Εικόνα 8: Σταυρωτής ροή ρευστών (Δαγκίνης & Γλύκας, 2017)

Οι εναλλάκτες αντίθετης ροής παρουσιάζουν την καλύτερη απόδοση σε σχέση με τους υπόλοιπους. Το μέγεθος που το υποδηλώνει αυτό είναι η μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά των δύο ρευστών, η οποία δίνεται από τη σχέση: (Δαγκίνης & Γλύκας, 2017)



$$\overline{\Delta T} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)}$$

Όπου:

ΔT_1 : Η διαφορά θερμοκρασίας στην είσοδο των ρευστών

ΔT_2 : Η διαφορά θερμοκρασίας στην έξοδο των ρευστών

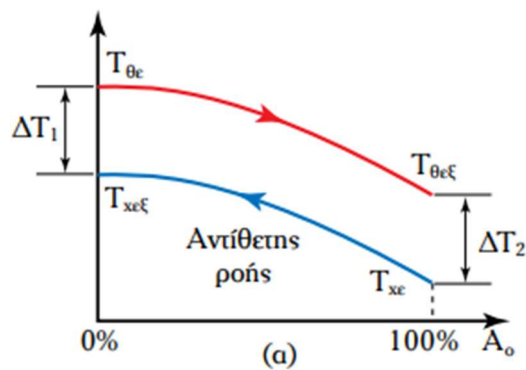


Figure 19: Διάγραμμα θερμοκρασιακής μεταβολής εναλλακτών αντίθετης ροής (Δαγκίνης & Γλύκας, 2017)

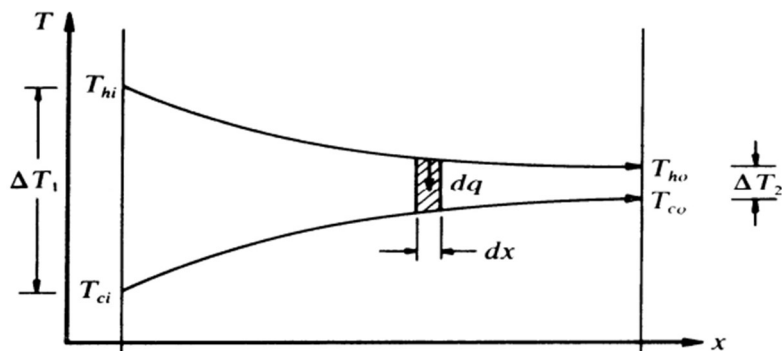


Figure 20: Διάγραμμα θερμοκρασιακής μεταβολής εναλλακτών ίδιας ροής (Καραπάντσιος, 2022)

Η βελτίωση της απόδοσης μπορεί να επιτευχθεί είτε με τη δημιουργία κάμψεων στους αυλούς είτε μέσω της ενσωμάτωσης διαφραγμάτων. (Δαγκίνης & Γλύκας, 2017)



Το μέγεθος που προσδιορίζει την απόδοση ενός εναλλάκτη είναι ο βαθμός αποτελεσματικότητας εναλλακτών (Number of transfer units - NTU) και δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{\text{πραγματική μετάδοση θερμότητας}}{\text{μέγιστη δυνατή μετάδοση θερμότητας}} = \frac{q_{actual}}{q_{max}}$$

Όπου:

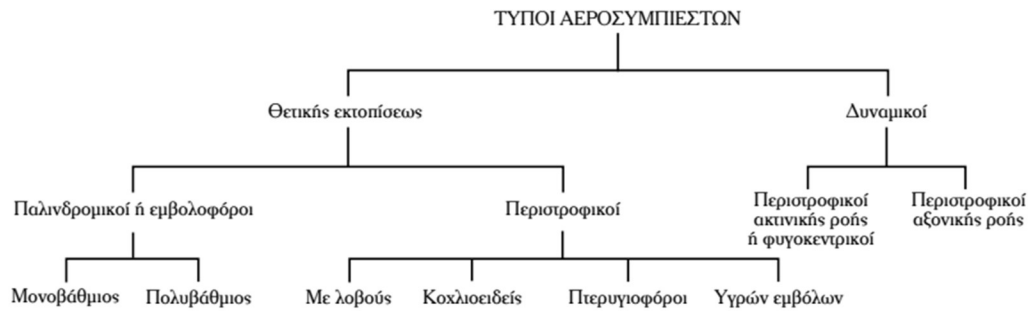
$$q_{actual} = C_h(T_{hi} - T_{ho}) = C_c(T_{co} - T_{ci}) \qquad q_{max} = C_{min}(T_{hi} - T_{ci})$$

Με τον όρο C ως ρυθμό θερμοχωρητικότητας του ρευστού και τους όρους T_{hi} , T_{ho} , T_{co} και T_{ci} να είναι οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου χαμηλής και υψηλής θερμοκρασίας αντίστοιχα του ρευστού. (Καραπάντσιος, 2022)

5.2.5 Αεροσυμπιεστές

Σημαντικά βοηθητικά μηχανήματα για την ομαλή λειτουργία του πλοίου αποτελούν και οι αεροσυμπιεστές. Η χρήση τους είναι να αυξάνουν την πίεση του αναρροφώμενου αέρα από το περιβάλλον με σκοπό τη χρήση του σε διάφορες εφαρμογές όπως είναι η εκκίνηση της κύριας μηχανής, η παροχή αέρα στα πνευματικά συστήματα, τον εξαερισμό των σωληνώσεων όπου μεταφέρεται το υγρό φορτίο και η χρήση σε καθαρισμούς και αποφράξεις.

Η βασική κατηγοριοποίηση των αεροσυμπιεστών είναι σε θετικούς εκτοπίσεως, όπου περιλαμβάνουν τους παλινδρομικούς και περιστροφικούς συμπιεστές, και σε δυναμικούς, όπου περιλαμβάνουν τους περιστροφικούς ακτινικής ροής / φυγόκεντροι και τους περιστροφικούς αξονικής ροής.



Εικόνα 9: Ταξινόμηση αεροσυμπιεστών (Δαγκίνης & Γλύκας, 2017)

Οι εμβολοφόροι συμπιεστές επιτυγχάνουν τη δημιουργία παραγωγής αέρα μεγαλύτερης πίεσης συγκριτικά με τους υπόλοιπους τύπους, ενώ μετά ακολουθούν οι περιστροφικοί αεροσυμπιεστές θετικής εκτοπίσεως και οι περιστροφικοί αεροσυμπιεστές ροής.

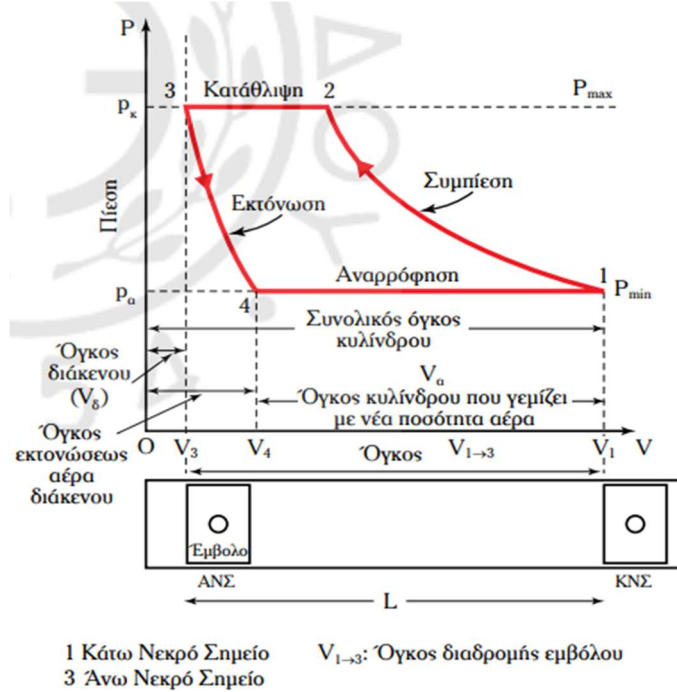
Η απόδοση ενός αεροσυμπιεστή δίνεται μέσω του συνολικού βαθμού απόδοσης, η οποία δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\eta_c = \eta_{cm} * \eta_m$$

Όπου:

η_{cm} : το ηλίκο του θεωρητικού προς του πραγματικού έργου

η_m : το ηλίκο του πραγματικού έργου του συμπιεστή προς το έργο που του προσδίδει ο κινητήρας.



Εικόνα 10: Διάγραμμα P-V παλινδρομικού αεροσυμπιεστή (Δαγκίνης & Γλύκας, 2017)

Σημαντικός επίσης είναι και ο θεωρητικός ογκομετρικός βαθμός απόδοσης με τον οποίο υπολογίζεται πόσο αποδοτικά αναρροφά ο συμπιεστής τον αέρα. Υπολογίζεται από την εξής σχέση: (Δαγκίνης & Γλύκας, 2017)

$$n_v = \frac{V_a}{V_{1 \rightarrow 3}}$$

Όπου:

V_a : όγκος ατμοσφαιρικού αέρα που εισέρχεται στον κύλινδρο

$V_{1 \rightarrow 3}$: όγκος διαδρομής εμβόλου



Κεφάλαιο 6^ο: Συμπεράσματα

Οι δείκτες ενεργειακής απόδοσης παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη νέων ενεργειακών πολιτικών και αποφάσεων. Η σύγκριση μεταξύ των δεικτών δίνει μια εικόνα σχετικά με τα δυνατά και τα αδύναμα στοιχεία που παρουσιάζουν. Σε αυτό το σημείο, πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφορες παράμετροι με τις οποίες κρίνεται η χρήση του κάθε δείκτη συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

- 1) Υποχρεωτική εφαρμογή: Με βάση τους διεθνείς κανονισμούς, οι υποχρεωτικοί δείκτες ενεργειακής απόδοσης με τους οποίους οφείλουν να συμμορφώνονται τα πλοία είναι ο EEDI, EEXI και CII. Αξίζει να αναφερθεί πως ο δείκτης EEOI που αναφέρεται στο SEEMP παραμένει ως εθελοντικός .
- 2) Ευκολία διαμόρφωσης: Η εισαγωγή του κριτηρίου διαμόρφωσης ενός δείκτη ενεργειακής απόδοσης καθορίζεται από την ευκολία συλλογής των απαραίτητων δεδομένων. Όλοι οι δείκτες μπορούν να διαμορφωθούν εύκολα με εξαίρεση τους EEOI, CII, EESH και ISPI, οι οποίοι απαιτούν συγκεκριμένες καταγραφές και πολλές φορές ευαίσθητα δεδομένα όπως το φορτίο που μεταφέρεται.
- 3) Αξιοπιστία ως προς τα GHG: Ένας δείκτης προκειμένου να χαρακτηριστεί αξιόπιστος πρέπει να στηρίζεται σε ακριβή δεδομένα. Με βάση την παραπάνω ανάλυση, ο δείκτης ενεργειακής απόδοσης EEOI θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως πιο αξιόπιστος από τους συνολικούς δείκτες ενεργειακής απόδοσης, αφού αφορά άμεσα τη λειτουργία του πλοίου και ενσωματώνει σαν μεταβλητή την πραγματική μάζα μεταφερόμενου φορτίου.



- 4) Ευκολία συλλογής πληροφοριών: Στους δείκτες που στηρίζονται στα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του πλοίου (EEDI, EEXI, EVDI) η συλλογή των πληροφοριών είναι αρκετά εύκολη αφού στηρίζονται στα σχέδια και στα εγχειρίδια των πλοίων τα οποία είναι διαθέσιμα. Ωστόσο, οι συνολικοί δείκτες που στηρίζονται στη λειτουργία του πλοίου χαρακτηρίζονται από λιγότερη ευκολία ως προς τη συλλογή πληροφοριών αφού απαιτούνται συγκεκριμένες καταγραφές και δεδομένα του φορτίου που δεν είναι εύκολα προσβάσιμα. Αναφορικά με τους επιμέρους δείκτες ενεργειακής απόδοσης, η συλλογή των πληροφοριών πραγματοποιείται με την εγκατάσταση ειδικών μετρητικών οργάνων ανάλογα με το υποσύστημα που μελετάται. Για παράδειγμα, η διαρκής παρακολούθηση των πιέσεων της κύριας μηχανής μέσω αισθητήρων πίεσης μπορεί να συμβάλλει τόσο στην έγκαιρη αντιμετώπιση κάποιας βλάβης όσο και στη διατήρηση υψηλών αποδόσεων.

- 5) Επίδραση από τις συνθήκες λειτουργίας: Οι συνθήκες λειτουργίας ενός πλοίου μεταβάλλονται από διάφορους εξωτερικούς παράγοντες ή παράγοντες που σχετίζονται με την κατάσταση λειτουργίας του. Είναι προφανές, πως ένα πλοίο έχει διαφορετικές ανάγκες ενέργειας όταν είναι για παράδειγμα στο αγκυροβόλιο, στη φορτοεκφόρτωση ή στην πλεύση. Με εξαίρεση τους δείκτες που στηρίζονται στα τεχνικά χαρακτηριστικά, όλοι οι υπόλοιποι δείκτες είναι ευμετάβλητοι στις παραπάνω συνθήκες.

- 6) Ευαίσθητα δεδομένα: Ο δείκτης ενεργειακής απόδοσης στον οποίο χρειάζονται ευαίσθητα δεδομένα είναι ο EEOI, αφού για τον υπολογισμό του λαμβάνεται υπόψη το βάρος του φορτίου που μεταφέρει. Αυτός είναι και ο λόγος που ο IMO δεν έχει προχωρήσει σε υποχρεωτική επιβολή του συγκεκριμένου δείκτη.

- 7) Κατηγοριοποίηση των δεικτών: Ακόμα οι ενεργειακοί δείκτες μπορούν να διαχωριστούν σε θερμοδυναμικούς και φυσικο-θερμοδυναμικούς. Το συμπέρασμα που εξάγεται είναι πως οι φυσικο-θερμοδυναμικοί δείκτες



επικρατούν έναντι των θερμοδυναμικών. Έτσι, εκτιμάται ότι για τη διαμόρφωση πολιτικής οι φυσικο-θερμοδυναμικοί δείκτες είναι πιο εύληπτοι ως προς την κατανόηση τονίζοντας έτσι τη βαρύτητα που έχει η καταγραφή του παραγόμενου έργου σε φυσικές μονάδες για την καλύτερη κατανόηση των μέτρων που πρέπει να ληφθούν για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου.

Όλα τα κριτήρια αξιολόγησης που αναλύθηκαν σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται παρακάτω, στον Πίνακα 8 και Πίνακα 9.

Συνοψίζοντας, οι ενεργειακοί δείκτες παίζουν σημαντικό ρόλο στον κλάδο της ναυτιλίας αφού παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την ενεργειακή απόδοση του πλοίου. Μέσω της παρακολούθησης αυτών των δεικτών μπορούν να πραγματοποιηθούν βελτιώσεις για τη μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται, την μείωση του κόστους και την ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου που επιφέρει η λειτουργία των πλοίων.



“Διερεύνηση και αξιολόγηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης στη ναυτιλία”

	EEDI	EEOI	EEXI	CII	EESH	ISPI	EVDI
Υποχρεωτικός	Yes	Maybe	Yes	Yes	No	No	No
Ευκολία διαμόρφωσης	Yes	Maybe	Yes	Maybe	Maybe	Maybe	Yes
Αξιοπιστία ως προς το GHG	Yes	Yes	Yes	Maybe	Maybe	Maybe	Yes
Ευκολία στη συλλογή πληροφοριών	Yes	Maybe	Yes	Maybe	Maybe	Maybe	Yes
Επίδραση από τις συνθήκες λειτουργίας	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No
Ευαίσθητα δεδομένα	No	Yes	No	Maybe	Maybe	Maybe	No
Θερμοδυναμικός δείκτης	No	No	No	No	No	No	No
Φυσικό-θερμοδυναμικός δείκτης	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

Ναι= Ίσως= Όχι=

Πίνακας 9: : Παρουσίαση και σύγκριση των συνολικών δεικτών ενεργειακής απόδοσης βάση κριτηρίων



“Διερεύνηση και αξιολόγηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης στη ναυτιλία”

	Κινητήρες		HVAC				Αντλίες	Εναλλάκτες	Αεροσυμπιεστές
	SFOC	η_m	η_B	EER	COP	η_{FAN}	η_p	ϵ	η_c
Υποχρεωτικός	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Ευκολία διαμόρφωσης	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Αξιοπιστία ως προς το GHG	Yes	Yes	Yes	Maybe	Maybe	Yes	Yes	Yes	Yes
Ευκολία στη συλλογή πληροφοριών	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Επίδραση από τις συνθήκες λειτουργίας	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Ευαίσθητα δεδομένα	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Θερμοδυναμικός δείκτης	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Φυσικό-θερμοδυναμικός δείκτης	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

Ναι= Ίσως= Όχι=

Πίνακας 10: Παρουσίαση και σύγκριση των επιμέρους δεικτών ενεργειακής απόδοσης βάση κριτηρίων



Βιβλιογραφία

- 1) Ahmari, H. & Kabir, S. M. I., 2017. *Applied Fluid Mechanics Lab Manual*, Uta: s.n.
- 2) Bannstrand, M., Jonsson, A., Karlsson, R. & Johnson, H., 2016. Study on the optimization of energy consumption as part of implementation of a ship energy efficiency management plan. Στο: *Air Pollution and Energy Efficiency Study Series*. s.l.:s.n.
- 3) Barreiro, J., Zaragoza, S. & Diaz-Casas, V., 2022. Review of ship energy efficiency. Στο: *Ocean Engineering*. s.l.:s.n.
- 4) BIMCO, 2020. The Shipping KPI Standard V4.0. September.
- 5) Brendel, M., 2010. *The Role of Fan Efficiency in Reducing HVAC Energy Consumption*, s.l.: s.n.
- 6) Bunse, K. και συν., 2011. Integrating energy efficiency performance in production management e gap analysis between industrial needs and scientific literature. Στο: *Cleaner Production*. s.l.:s.n.
- 7) Chris Marine, 2022. *Chris Marine*. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://chris-marine.com/eexi-compliance-with-chris-marine-shaft-power-limitation/> [Πρόσβαση 31 Μάρτιος 2023].
- 8) Class NKK, 2015. *TEC-1048: Survey and Certification for EEDI and SEEMP required by the Amendments to ANNEX VI of MARPOL 73/78*. s.l.:s.n.
- 9) DNV, 2022. *DNV*. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/eexi/advisory-service-factual-statement.html> [Πρόσβαση 22 Μάρτιος 2023].



- 10) Fan, A. και συν., 2022. A review of ship fuel consumption models. Στο: *Ocean Engineering*. s.l.:s.n.
- 11) HKJB & HKIMT, 2021. *New IMO Regulations on EEXI & CII to Cut Carbon Intensity from Existing Ships*. Hong Kong: s.n.
- 12) ICS, BIMCO & INTERTANKO, 2018. *Review of candidate Measures to Reduce GHG emissions from international shipping*. s.l.:s.n.
- 13) IMO, 2012. *MEPC.1/Circ.796 - INTERIM GUIDELINES FOR THE CALCULATION OF THE COEFFICIENT f_w FOR DECREASE IN SHIP SPEED IN A REPRESENTATIVE SEA CONDITION FOR TRIAL USE*. London: s.n.
- 14) IMO, 2021. *RESOLUTION MEPC.337(76) - 2021 Guidelines on the reference lines for use with operational intensity indicators (CII Reference lines guidelines, G2)*, s.l.: s.n.
- 15) IMO, 2022. *IMO*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/EEXI-CII-FAQ.aspx>
[Πρόσβαση 2023 Μάρτιος 2023].
- 16) International Maritime Organization, 2018. *RESOLUTION MEPC.304(72) - Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships*, s.l.: s.n.
- 17) International Maritime Organization, 2018. *RESOLUTION MEPC.308(73) - 2018 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships*, s.l.: s.n.
- 18) International Maritime Organization, 2021. *Fourth IMO GREENHOUSE GAS STUDY*. s.l.:s.n.
- 19) International Maritime Organization, 2021. *RESOLUTION MEPC.328(76) - Amendments to the Annex of Protocol of 1997 to amend the International Convention for the Prevention of Pollution from ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto*, s.l.: s.n.



- 20) International Maritime Organization, 2022. *RESOLUTION MEPC.350(78) - 2022 Guidelines on the method of calculation of the attained Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI)*, s.l.: s.n.
- 21) Jain, N. και συν., 2015. *Greenhouse Gas Emissions and Global Warming*.
- 22) Knorring, H. V., 2019. *Transportation Research. Energy audits in shipping companies*.
- 23) MEPC 75/15/Add.2, 2021. *RESOLUTION MEPC.335(76) - 2021 Guidelines on the shaft / engine power limitation system to comply with the EEXI requirements and use of a power reserve*. s.l.:s.n.
- 24) MEPC.1/Circ.684, 2009. *GUIDELINES FOR VOLUNTARY USE OF THE SHIP ENERGY EFFICIENCY OPERATIONAL INDICATOR (EEOI)*, 17 August.
- 25) MEPC.203(62), 2011. *AMENDMENTS TO THE ANNEX OF THE PROTOCOL OF 1997 TO AMEND THE INTERNATIONAL CONVENTION FOR THE PREVENTION OF POLLUTION FROM SHIPS, 1973, AS MODIFIED BY THE PROTOCOL OF 1978 RELATING THERETO*, 15 July.
- 26) MEPC.282(70), 2016. *2016 GUIDELINES FOR THE DEVELOPMENT OF A SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP)*, 28 October.
- 27) MEPC.338(76), 2021. *RESOLUTION MEPC.338(76) - 2021 Guidelines on the operational carbon intensity reduction factors relative to reference line (CII reduction factors guidelines, G3)*. s.l.:s.n.
- 28) MEPC.353(78), 2022. *2022 GUIDELINES ON THE REFERENCE LINES FOR USE WITH OPERATIONAL CARBON INTENSITY INDICATORS (CII REFERENCE LINES GUIDELINES, G2)*, 10 June.
- 29) Mihai, V. & Rusu, L., 2021. *An Overview of the Ship Ventilation Systems and Measures to Avoid the Spread of Diseases*, s.l.: s.n.
- 30) Nippon Kaiji Kyokai, 2021. *Outlines of EEXI regulation*. s.l.:s.n.



- 31) Nuchturee, C., Li, T. & Xia, H., 2020. Energy efficiency of integrated electric propulsion for ships – A review. Στο: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. s.l.:s.n.
- 32) Ozturk, O. B. & Basar, E., 2022. Ocean Engineering. Στο: *Multiple linear regression analysis and artificial neural networks based decision support system for energy efficiency in shipping*. s.l.:s.n.
- 33) Panagakos, G. και συν., 2019. *Monitoring the Carbon Footprint of Dry Bulk Shipping in the EU: An Early Assessment of the MRV Regulation*, s.l.: s.n.
- 34) Patterson, M. G., 1996. What is energy efficiency?.
- 35) Perez-Lombard, L., Ortiz, J., Maestre, I. R. & Coronel, J. F., 2011. Constructing HVAC energy efficiency indicators. Στο: *Energy and Buildings*. s.l.:s.n.
- 36) Rightship, 2022. *Rightship*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://rightship.com/insights/updated-ghg-rating-methodology-encompasses-eexi-looks-ahead-cii-qa>
[Πρόσβαση 22 Μάρτιος 2023].
- 37) Rightship, 2022. *Rightship*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://rightship.com/node/97>
[Πρόσβαση 21 Μάρτιος 2023].
- 38) van Leeuwen, J. & Monios, J., 2022. Marine Policy. *Decarbonisation of the shipping sector - Time to ban fossil fuels?*.
- 39) Δαγκίνης, Ι. Κ. & Γλύκας, Α. Ι., 2017. *Βοηθητικά μηχανήματα πλοίων*. Β' επιμ. Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδου.
- 40) Δανιήλ, Γ. & Μιμηκόπουλος, Κ. Η., 2002. *Ναυτικοί Ατμολέβητες*. Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδου.
- 41) Ηλιόπουλος, Χ., 2018. Βελτιστοποίηση Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίων με Energy Audits. Φεβρουάριος.
- 42) Καραπάντσιος, Θ., 2022. *Εναλλάκτες Θερμότητας*. s.l.:s.n.



- 43) Κατσαπρακάκης, Δ. Α. & Μονιάκης, Μ., 2015. *Θέρμανση - Ψύξη - Κλιματισμός*. s.l.:s.n.
- 44) Κοτρίκλα, Α. Μ., 2015. *Ναυτιλία και Περιβάλλον*. s.l.:s.n.
- 45) Παπαϊωάννου, Α. Θ., 2002. *Μηχανική των Ρευστών - Τόμος II. Β' επιμ.* Αθήνα: ΚΟΡΑΛΙ.
- 46) Τρύπατζη, Ε. Λ., 2017. *Ναυτιλία, Μεταφορές και Διεθνές Εμπόριο – ΝΑ.Μ.Ε.* Χίος: s.n.
- 47) Φραγκόπουλος, Χ. & Προυσαλίδης, Ι., 2019. *Ενεργειακά Συστήματα Πλοίου*. Αθήνα: DAVINCI.